

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh vodorovného parního generátoru pro jadernou elektrárnu VVER 640

Proposal of the Horizontal Steam Generator for Nuclear Power
Plant VVER 640

Vypracoval:

Bc. Stanislav Honus

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

v Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

Stanislav Honus

Adresa trvalého pobytu diplomanta:

Poštovní 416, Bohuslavice, PSČ: 747 19

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HONUS, S.: Návrh vodorovného parního generátoru pro jadernou elektrárnu VVER 640.

Ostrava: katedra energetiky 361, Fakulta strojní VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 107 s. Diplomová práce, vedoucí: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem vodorovného parního generátoru pro jadernou elektrárnu VVER 640. V úvodní části je popsán primární okruh jaderné elektrárny a vývoj jednotlivých typů bloků VVER. Pozornost je poté věnována charakteristice parního generátoru (PG) a jeho úloze v okruhu jaderné elektrárny.

Na základě zadaných parametrů je proveden tepelný výpočet PG, nutný pro stanovení potřebné teplosměnné plochy a délky trubek. Projekt obsahuje volbu materiálů a pevnostní kontrolu jednotlivých segmentů PG. Tlakové ztráty primárního okruhu PG jsou stanoveny v hydraulickém výpočtu. Závěr práce je zaměřen na návrh separačního zařízení nutného pro odstranění vlhkosti z vyrobené páry.

ANNOTATION DER DIPLOMARBEIT

HONUS, S.: Entwurf horizontales Dampfgenerators für das Kernkraftwerk VVER 640.

Ostrava: Lehrstuhl für Energetik 361, Fakultät für Maschinenbau VSB - Technische Universität Ostrava, 2009, 107 S. Diplomarbeit, Leiter: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc

Vorgelegte Diplomarbeit befasst sich mit dem Konstruktionsentwurf horizontales Dampfgenerators für das Kernkraftwerk VVER 640. Im Einführungsteil ist der Primärkreis und die Entwicklung von einzelnen VVER Kernkraftblöcken beschrieben. Weiterhin wird die Aufmerksamkeit auf die Dampfgeneratorscharakteristik (DG) und ihre Aufgabe im Kernkraftkreis gewidmet.

Auf Grund vorgegebenen Parametern ist die für die Feststellung der Wärmesvertauschfläche und der Rohrlänge erforderliche Wärmeberechnung durchgeführt worden. Die Arbeit beinhaltet weiter die Materialauswahl und die Festigkeitsüberprüfung einzelner DG-Segmenten. Die Druckverluste des DG-Primärkreises sind festgelegt.

Abschliessend ist der Entwurf der für die Behebung der Dampf Feuchtigkeit erforderlichen Trennvorrichtung vorgenommen worden.

Obsah:

Seznam použitého označení.....	9
1. Úvod	15
2. Primární okruh jaderné elektrárny.....	17
3. Generace VVER.....	20
3.1 Historie reaktorů VVER.....	20
3.2 Blok VVER 640	22
4. Popis parního generátoru	25
5. Tepelný výpočet parního generátoru	28
5.1 Počet trubek a celková průtočná plocha primárního média	29
5.2 Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a vnitřní stěnou trubky	31
5.3 Součinitel přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a sekundárním médiem	33
5.4 Střední logaritmická teplota	33
5.5 Součinitel prostupu tepla.....	35
5.6 Velikost teplosměnné plochy a střední délka trubky	37
5.7 Parní a tepelný výkon parního generátoru	38
6. Tepelné zatížení teplosměnné plochy po délce trubky	40
7. Materiály parního generátoru.....	50
8. Návrh a pevnostní výpočet základních rozměrů parního generátoru	53
8.1 Plášť parního generátoru	53
8.1.1 Tloušťka stěny středního kroužku PG.....	55
8.1.2 Tloušťka stěny bočního kroužku PG	62
8.1.3 Tloušťka stěny eliptického dna PG.....	65
8.1.4 Tloušťka stěny nátrubku průlezu PG	68
8.1.5 Tloušťka deskového víka průlezu PG	68
8.1.6 Tloušťka stěny nátrubku průlezu II. okruhu.....	69
8.1.7 Tloušťka stěny eliptického víka průlezu II. okruhu.....	70
8.1.8 Tloušťka stěny nátrubku napájecí vody	71
8.1.9 Tloušťka stěny nátrubku o průměru 1105 mm	72
8.1.10 Tloušťka stěny nátrubku přívodu havarijní vody	72
8.1.11 Tloušťka stěny nátrubku páry	73

8.2 Kolektor páry.....	74
8.2.1 Tloušťka stěny válcové části kolektoru páry	74
8.2.2 Tloušťka stěny kulového dna kolektoru páry	77
8.2.3 Tloušťka stěny nátrubku kolektoru páry	78
8.3 Kolektor I. okruhu	79
8.3.1 Tloušťka stěny deskového víka průlezu I. okruhu.....	79
8.3.2 Tloušťka stěny horní válcové části kolektoru.....	80
8.3.3 Tloušťka kuželové části kolektoru.....	80
8.3.4 Tloušťka stěny děrované válcové části kolektoru.....	82
8.3.5 Tloušťka stěny kolektoru v místě svaru přechodového prstence.....	83
8.3.6 Tloušťka stěny teplosměnné trubky kolektoru	84
8.3.7 Tloušťka stěny válcové části přechodového prstence kolektoru	85
8.4 Tabulka základních rozměrů parního generátoru	86
9. Hydraulický výpočet I. okruhu parního generátoru	87
9.1 Stanovení jednotlivých hydraulických ztrát.....	88
9.1.1 Tlaková ztráta na vstupu do přiváděcího kolektoru.....	88
9.1.2 Tlaková ztráta v přiváděcím kolektoru	89
9.1.3 Tlaková ztráta na vstupu do teplosměnných trubek.....	89
9.1.4 Tlaková ztráta prouděním v teplosměnných trubkách	90
9.1.5 Tlaková ztráta změnou směru proudu.....	91
9.1.6 Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek.....	91
9.1.7 Tlaková ztráta v odváděcím kolektoru.....	92
9.1.8 Tlaková ztráta na výstupu z odváděcího kolektoru	93
9.2 Celková tlaková ztráta primárního okruhu parního generátoru.....	94
10. Návrh separace páry	95
10.1 Žaluziový separátor.....	96
10.2 Výpočet žaluziové separace	97
10.3 Hydraulický výpočet žaluziového separátoru:	100
11. Závěr a shrnutí dosažených výsledků.....	101
12. Seznam použité literatury	103
13. Přílohy.....	105

Seznam použitého označení

Kapitola 5, 6

A	[1]	Výpočtová konstanta
G	[kg.s ⁻¹]	Parní výkon
L _{tr}	[m]	Délka střední trubky
L _{trC}	[m]	Celková délka trubek
Nu _{I,St}	[1]	Nusseltovo kritérium I. média při střední teplotě
Pr _{I,St}	[1]	Prandtlovo kritérium při střední teplotě I. média
Pr _{trSt}	[1]	Prandtlovo kritérium při střední teplotě stěny trubky
Q _{PG}	[kW]	Tepelný výkon parního generátoru (zadaný)
Q _{PGsk}	[kW]	Skutečný tepelný výkon parního generátoru
R _c	[m ² .K.W ⁻¹]	Celkový tepelný odpor
Re _{I,St}	[1]	Reynoldsovo číslo I. média při střední teplotě
S	[m ²]	Teplosměnná plocha
S _{I,C}	[m ²]	Celková průtočná plocha I. média
S _{I,C(t)}	[m ²]	Celková průtočná plocha I. média (teoretická)
S _{tr}	[m ²]	Průtočná plocha jedné teplosměnné trubky
d ₁	[mm]	Vnitřní průměr teplosměnné trubky
d ₂	[mm]	Vnější průměr teplosměnné trubky
i'	[kJ.kg ⁻¹]	Entalpie syté vody
i''	[kJ.kg ⁻¹]	Entalpie syté páry
i _{I,1}	[kJ.kg ⁻¹]	Entalpie I. média – vstup
i _{I,2}	[kJ.kg ⁻¹]	Entalpie I. média – výstup
i _{NV}	[kJ.kg ⁻¹]	Entalpie napájecí vody (t = 220°C)
k	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla
l _v	[kJ.kg ⁻¹]	Výparné teplo vody
m _I	[kg.s ⁻¹]	Průtok I. média
n _{tr}	[1]	Celkový počet trubek
n _{tr(t)}	[1]	Celkový počet trubek (teoretický)
p _I	[MPa]	Tlak v I. okruhu
p _{II}	[MPa]	Tlak syté páry

q_{lSt}	$[W.m^{-1}]$	Střední tepelný tok stěnou trubky (na délkový metr)
q_{St}	$[W.m^{-2}]$	Střední tepelný tok stěnou trubky
$q_{St(t)}$	$[W.m^{-2}]$	Střední tepelný tok stěnou trubky (teoretický)
$t_{l,1}$	$[^{\circ}C]$	Teplota I. média – vstup
$t_{l,2}$	$[^{\circ}C]$	Teplota I. média – výstup
$t_{l,St}$	$[^{\circ}C]$	Střední teplota I. média
$t_{II.}$	$[^{\circ}C]$	Teplota syté páry
t_{NV}	$[^{\circ}C]$	Teplota napájecí vody
$t_{trI.}$	$[^{\circ}C]$	Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média
$t_{trII.}$	$[^{\circ}C]$	Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média
t_{trSt}	$[^{\circ}C]$	Střední teplota stěny trubky
$t_{trSt(t)}$	$[^{\circ}C]$	Střední teplota stěny trubky (teoretická)
$v_{l,St}$	$[m^3.kg^{-1}]$	Měrný objem I. média při střední teplotě
$w_{l.}$	$[m.s^{-1}]$	Střední rychlost proudění I. média
$w_{l.(t)}$	$[m.s^{-1}]$	Střední rychlost proudění I. média (teoretická)
ΔQ_{PGrel}	$[\%]$	Odklon skutečného tepelného výkonu PG od zadaného
Δq_{rel}	$[\%]$	Relativní chyba volené hodnoty středního tepelného toku
Δt_1	$[^{\circ}C]$	Teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem
Δt_2	$[^{\circ}C]$	Teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem
$\Delta t_{l.}$	$[^{\circ}C]$	Teplotní spád I. média
Δt_{ln}	$[^{\circ}C]$	Střední logaritmický teplotní spád
Δt_{trRel}	$[\%]$	Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky
$\alpha_{l.}$	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla na straně I. média
$\alpha_{II.}$	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla na straně II. média
$\eta_{l,St}$	$[kg.m^{-1}.s^{-1}]$	Dynamická viskozita I. média při střední teplotě
η_{PG}	$[\%]$	Účinnost parního generátoru
$\lambda_{l,St}$	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti I. média při střední teplotě
λ_{tr}	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti teplosměnné trubky
$\rho_{l,St}$	$[kg.m^{-3}]$	Hustota I. média při střední teplotě
$\nu_{l,St}$	$[m^2.s^{-1}]$	Kinematická viskozita I. média při střední teplotě

Kapitola 7,8

D	[mm]	Nominální vnitřní průměr válcové části tlakové nádoby, víka, dna nebo potrubí
D _s	[mm]	Střední průměr pláště
D _v	[mm]	Nominální vnější průměr válcové části tlakové nádoby, víka, dna nebo potrubí
K	[1]	Koeficient tvaru víka
K ₀	[1]	Koeficient oslabení vlivem otvorů
L	[mm]	Vzdálenost okrajů otvorů
R _e	[MPa]	Mez kluzu
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
a	[mm]	Vzdálenost mezi příčnými řadami při šachovnicovém uspořádání otvorů
b	[mm]	Vzdálenost mezi podélnými řadami při šachovnicovém uspořádání otvorů
c	[mm]	Přídavek k tloušťce stěny
c ₁	[mm]	Záporná tolerance tloušťky stěny
c ₂	[mm]	Zeslabení stěny vlivem všech druhů korozí
d	[mm]	Vnitřní průměr otvoru, nátrubku
d _{vn}	[mm]	Vnější průměr nátrubku
f _h	[mm ²]	Plocha vyztužujícího průřezu nátrubku
h	[mm]	Hloubka eliptického dna, víka
h _h	[mm]	Výška vyztužující části nátrubku
h _{hmax}	[mm]	Maximální výška vyztužující části nátrubku
k _k	[1]	Koeficient bezpečnosti
m	[1]	Pomocná výpočtová hodnota
p	[MPa]	Výpočtový tlak
s	[mm]	Minimální nominální tloušťka stěny
s ₁	[mm]	Tloušťka deskového víka
s _h	[mm]	Nominální tloušťka stěny nátrubku
s _N	[mm]	Navržená nominální tloušťka stěny
s _{oh}	[mm]	Minimální výpočtová tloušťka pro vyztužení otvoru
α	[°]	Úhel sklonu stěny kuželové části kolektoru

σ_D	[MPa]	Nominální dovolené napětí
φ	[1]	Koeficient pevnosti elementu oslabeného otvory nebo svarovým švem
φ_0	[1]	Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti elementu oslabeného otvory nebo svarovým švem

Kapitola 9

L_{tr}	[m]	Délka střední trubky
$Re_{L,St}$	[1]	Reynoldsovo číslo I. média při střední teplotě
$S_{I,C}$	[m ²]	Celková průtočná plocha I. média
X_1	[1]	Ztrátový součinitel při proudění přiváděcím kolektorem
X_2	[1]	Ztrátový součinitel při proudění odváděcím kolektorem
d_1	[mm]	Vnitřní průměr teplosměnné trubky
d_{k1}	[m]	Vnitřní průměr přiváděcího kolektoru
d_{k2}	[m]	Vnitřní průměr odváděcího kolektoru
d_{op}	[m]	Vnitřní průměr odváděcího potrubí
d_{pp}	[m]	Vnitřní průměr přiváděcího potrubí
l_{k1}	[m]	Výpočtová délka přiváděcího kolektoru
l_{k2}	[m]	Výpočtová délka odváděcího kolektoru
m_I	[kg.s ⁻¹]	Průtok I. média
p_{z1}	[Pa]	Tlaková ztráta na vstupu do přiváděcího kolektoru
p_{z2}	[Pa]	Tlaková ztráta v přiváděcím kolektoru
p_{z3}	[Pa]	Tlaková ztráta na vstupu do trubek
p_{z4}	[Pa]	Tlaková ztráta prouděním v trubkách
p_{z5}	[Pa]	Tlaková ztráta změnou směru proudění
p_{z6}	[Pa]	Tlaková ztráta na výstupu z trubek
p_{z7}	[Pa]	Tlaková ztráta v odváděcím kolektoru
p_{z8}	[Pa]	Tlaková ztráta na výstupu z odváděcího kolektoru
p_{zC}	[Pa]	Celková tlaková ztráta v I. okruhu parního generátoru
$t_{I,1}$	[°C]	Teplota I. média – vstup
$t_{I,2}$	[°C]	Teplota I. média – výstup
$t_{I,st}$	[°C]	Střední teplota I. média

w_L	$[m.s^{-1}]$	Střední rychlost proudění I. média
$w_{L.1}$	$[m.s^{-1}]$	Střední rychlost proudění I. média na vstupu do střední řady trubek
$w_{L.2}$	$[m.s^{-1}]$	Střední rychlost proudění I. média na výstupu ze střední řady trubek
w_{k1}	$[m.s^{-1}]$	Rychlost proudění I. média v příváděcím kolektoru
w_{k2}	$[m.s^{-1}]$	Rychlost proudění I. média v odváděcím kolektoru
w_{op}	$[m.s^{-1}]$	Rychlost proudění I. média v odváděcím potrubí
w_{pp}	$[m.s^{-1}]$	Rychlost proudění I. média v příváděcím potrubí
ζ_{k1}	[1]	Ztrátový součinitel na vstupu do příváděcího kolektoru
ζ_{k2}	[1]	Ztrátový součinitel na výstupu z odváděcího kolektoru
ζ_{tr1}	[1]	Ztrátový součinitel na vstupu do střední řady trubek
ζ_{tr2}	[1]	Ztrátový součinitel na výstupu ze střední řady trubek
ζ_{zsp}	[1]	Ztrátový součinitel změnou směru proudění
λ	[1]	Součinitel tření
$\rho_{L.1}$	$[kg.m^{-3}]$	Hustota I. média při vstupní teplotě
$\rho_{L.2}$	$[kg.m^{-3}]$	Hustota I. média při výstupní teplotě
$\rho_{L.St}$	$[kg.m^{-3}]$	Hustota I. média při střední teplotě

Kapitola 10

$(1-x)$	[1]	Vlhkost páry
C	[1]	Parametr charakterizující max. zatížení
G	$[kg.s^{-1}]$	Parní výkon
Ku	[1]	Kutateladzeho kritérium
M	[1]	Pomocný parametr
S_h	$[m^2]$	Plocha hladiny
S_{sep}	$[m^2]$	Průtočná plocha separátoru
$S_{sep(dop)}$	$[m^2]$	Průtočná plocha separátoru (doporučená)
$b_{\check{z}}$	[m]	Rozvinutá šířka žaluzie
g	$[m.s^{-2}]$	Tíhové zrychlení
h_p	[m]	Průměrná výška parního prostoru
$h_{\check{z}}$	[m]	Výška žaluzie
l_{sep}	[m]	Délka separátoru
p_{Zsep}	[Pa]	Tlaková ztráta separátoru

t_z	[m]	Rozteč žaluzií
w_h	[m.s ⁻¹]	Parní zatížení hladiny
w_{kr}	[m.s ⁻¹]	Kritická rychlost
w_{sep}	[m.s ⁻¹]	Vstupní rychlost páry do separátoru
$w_{sep(dop)}$	[m.s ⁻¹]	Vstupní rychlost páry do separátoru (doporučená)
x	[1]	Suchost
α	[°]	Polovina úhlu zakřivení toku páry
ζ_z	[1]	Koeficient odporu žaluzie
ρ'	[kg.m ⁻³]	Hustota syté vody
ρ''	[kg.m ⁻³]	Hustota syté páry
ρ_{mp}	[kg.m ⁻³]	Hustota vstupující mokré páry
σ	[N.m ⁻¹]	Povrchové napětí vody

1. Úvod

Jaderné elektrárny dnes vyrábějí kolem 15-ti % světové elektřiny, přičemž v EU je to přibližně 35 % z vyrobené elektřiny. V provozu je 442 bloků ve 31 zemích světa - především v Evropě, Severní Americe a Kanadě. Přesto se v současnosti na poli jaderné energetiky nejvíc podílí Asie, kde se plánuje, nebo je ve výstavbě, 63 nových bloků jaderných elektráren. Ze států zvažujících využívat jádro jako zdroj energie převažuje rovněž Asie (8 zemí), následuje Afrika (3 země), Jižní Amerika (2 země), Evropa (5 zemí), Austrálie a Nový Zéland.

Podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) se v Evropě v 18 zemích provozuje dohromady 196 reaktorů a dalších šest se momentálně staví. V plánu je výstavba dalších patnácti nových reaktorů, z toho osm v Rusku, po dvou v Bulharsku, Slovensku a Ukrajině a jeden ve Finsku.

Do budoucna se odhaduje, že počet jaderných zařízení bude ve světě nadále vzrůstat. Nejvíce v Číně, Indii, Rusku, Jižní Africe a USA. Podle japonského institutu Institute of Energy Economics se má Instalovaný výkon JE do roku 2030 zvýšit o 30% (ze současných 385 GW na 499 GW). Můžeme tedy mluvit o jakési renesanci jaderné energie.

V České republice jsou kapacity pro výrobu energie prozatím dostačující, ovšem s časem, kdy budou uhelné elektrárny dosluhovat a především z prognózy zvyšující se spotřeby elektřiny v ČR (a také ve světě i v EU), lze očekávat deficit elektrické energie a s tím související podporu získání energie z obnovitelných zdrojů, renovací uhelných elektráren a hlavně z výstavby nových jaderných bloků.

V souvislosti s plánováním nových projektů se hovoří o reaktorech III. a IV. generace. Tyto nové generace jaderných reaktorů vycházejí ze zdokonalování již existujících typů, znalostí ověřených konstrukčních prvků a využívání nových technologických možností.

Pro třetí generaci jaderných reaktorů je význačná zvýšená spolehlivost a bezpečnost, nižší investiční náklady, delší životnost, menší množství radioaktivního odpadu a celková vyšší efektivnost provozu. Do této generace řadíme například projekty EPR – Evropský tlakovodní reaktor, japonský SWR-100 nebo následovníky u nás známého typu VVER (vodovodný energetický reaktor), a to projekt VVER 1000 nebo VVER 640, ke kterému se vztahuje tato diplomová práce.

Projekty III. Generace se v porovnání se svými předchůdci vyznačují zjednodušenou konstrukcí. Některé jsou konstruovány jen jako dvousmyčkové místo čtyřsmyčkových (Temelín) či šestismyčkových (Dukovany). Tyto reaktory ušetří kolem 20 % paliva a vyprodukují o 15 % méně radioaktivních odpadů. Životnost je předpokládána na minimálně 60 let.

Projekty IV. Generace jaderných reaktorů se na mezinárodní úrovni rozvíjí již dnes. Jejich činnost by měla být zahájena po roce 2030. Vyznačují se ještě větší bezpečností, ekonomičností a spolehlivostí. Z bezpečnostního hlediska bude například určujícím faktorem nulová pravděpodobnost poškození aktivní zóny reaktoru nebo tolerance reaktoru k chybám lidské obsluhy. Do oblasti ekonomické spadá kupříkladu krátký časový úsek výstavby elektrárny či cenová konkurenceschopnost výroby elektřiny ve srovnání s ostatními zdroji v regionu.

Nedílnou součástí celého systému okruhu jaderné elektrárny je zařízení pro výrobu páry – parní generátor (PG), jehož návrhem se zabývá tato diplomová práce. PG je tepelný výměník, prostřednictvím kterého dochází k převodu tepelné energie radioaktivního primárního okruhu do neaktivního sekundárního okruhu jaderné elektrárny. Konkrétně se jedná o horizontálního typ s tepelným výkonem 480 MW ve čtyřsmyčkovém uspořádání. Konstrukční návrh bude obsahovat tepelný, pevnostní a hydraulický výpočet a s nimi související volbu základních rozměrů PG. Práce se také zaměřuje na možnosti snižování vlhkosti z vyrobené páry a výpočtem potřebného separačního zařízení.

Tento projekt parního generátoru je určen pro jadernou elektrárnu III. generace s již výše zmíněným tlakovodním reaktorem VVER s elektrickým výkonem 640 MWe.

2. Primární okruh jaderné elektrárny

V primárním okruhu jaderné elektrárny (JE) dochází k odvodu teplotnosného média z reaktoru do tepelného výměníku (parního generátoru), kde je tepelná energie předána okruhu sekundárnímu. Na výstupu z výměníku se ochlazené teplotnosné médium vrací zpět do reaktoru, kde se opět ohřeje.

Popis jednotlivých částí primárního okruhu:

Jaderný reaktor:

Zařízení, ve kterém se energie uvolněná při jaderném štěpení přeměňuje na energii tepelnou, jež je odváděna vodou, která reaktorem protéká a ochlazuje jeho aktivní zónu.

V případě této diplomové práce je parní generátor navrhován pro elektrárnu s reaktorem typu VVER (z ruštiny – VodoVodjanyj Energetičeskij Reaktor). Jedná se o lehkovodní tlakový reaktor známý též pod zkratkou PWR (Pressurized Water Reactor). Palivem je obohacený uran ve formě oxidu uraničitého UO_2 . Jako chladivo i moderátor reakce se používá obyčejná voda.

Jde o vůbec nejpoužívanější typ reaktoru. Najdeme jej v obou našich jaderných elektrárnách.

Regulační tyče:

Zasouvají se do reaktoru a řídí rychlost reakce. Dochází k regulaci množství volných neutronů a tím i průběhu štěpení a výkonu reaktoru. Regulační tyče slouží současně jako bezpečnostní prvek, poněvadž přebytek neutronů by vyvolal lavinovité štěpení a následnou havárii reaktoru.

Vhodným materiálem regulačních tyčí pro absorpci přebytečných neutronů je kadmium.

Aktivní zóna reaktoru:

Část reaktoru, ve které probíhá štěpná reakce, z níž je vzniklé teplo odváděno chladivem k parnímu generátoru. V aktivní zóně reaktoru je uloženo palivo.

Parní generátor:

Tepelný výměník, v němž proudí ohřátá voda z reaktoru a předává svoji tepelnou energii cirkulujícímu médiu v odděleném sekundárním okruhu. V okruhu sekundárním je tlak nižší než v primárním, čímž vzniká pára, která proudí do turbíny.

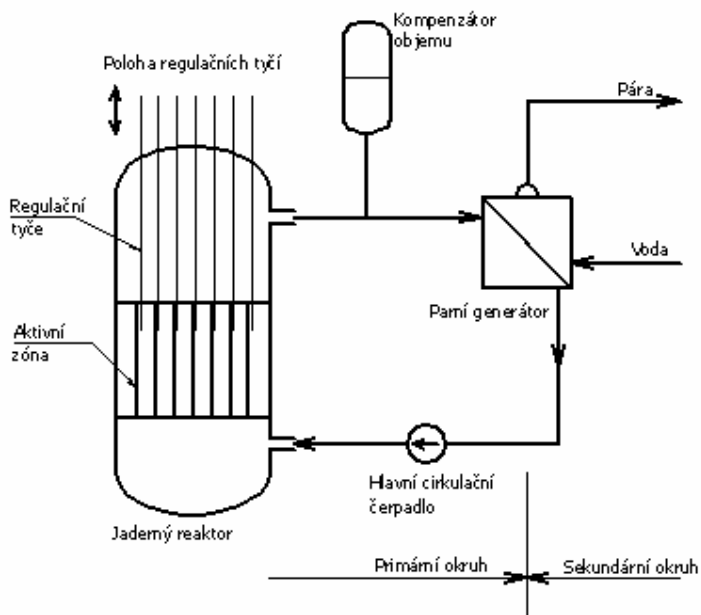
Kompenzátor objemu:

Zařízení sloužící k vyrovnávání tlakových změn primárního okruhu, které vznikají vlivem tepelných dilatací chladiva. Pracuje jako vyrovnávací nádrž doplňující nebo odebírající kapalně chladivo z primárního okruhu při změnách jeho objemu.

Kompenzátor objemu (KO) má vodní a parní prostor. Vodní prostor je trvale spojen s částí horké větve jedné ze smyček primárního okruhu. Nad vodní hladinou je parní polštář, pomocí kterého dochází k vyrovnávání tlaku v KO. Při poklesu tlaku v KO se automaticky zapnou ohříváky vody, čímž nastane vývin páry a tlak stoupá. Po dosažení předepsaného tlaku se ohříváky automaticky vypnou. Dojde-li k zvýšení tlaku, otevře se regulační ventil a do parního prostoru KO se tryskami rozprašuje studená voda, čímž dochází ke kondenzaci páry a poklesu tlaku.

Hlavní cirkulační čerpadlo:

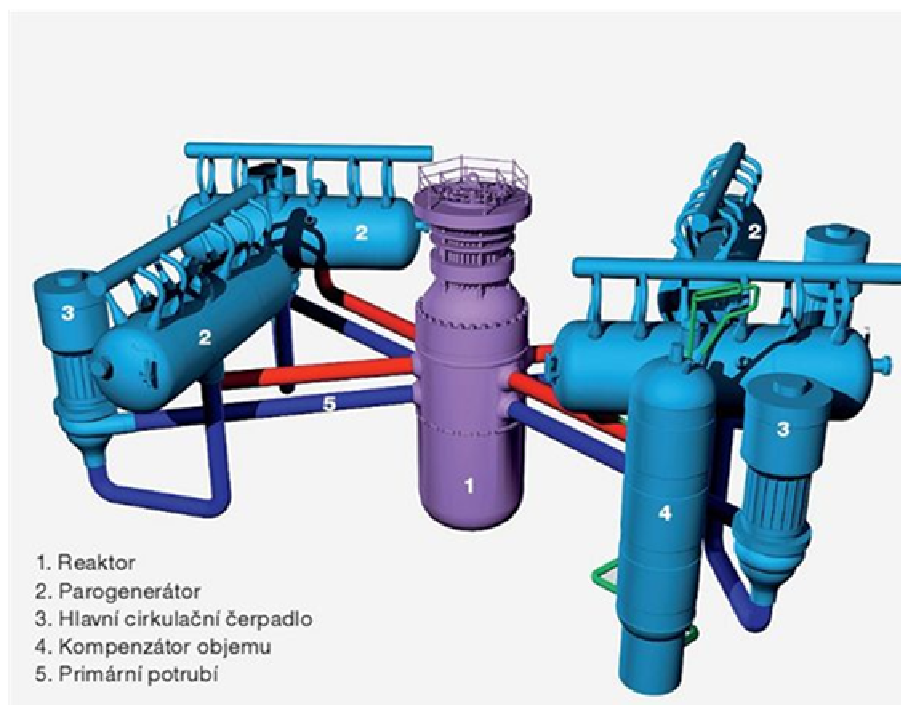
Zajišťuje proudění chladiva mezi reaktorem a parním generátorem. Patří mezi technologicky nejnáročnější čerpadla v jaderné elektrárně z důvodu vysokého tlaku, teploty a radioaktivity dopravované vody.



Obr. 2.1.: Schéma primárního okruhu jaderné elektrárny

Uspořádání primárního okruhu jaderné elektrárny VVER 640:

Primární okruh JE je rozdělen do čtyř smyček. V každé smyčce je jeden parní generátor a jedno hlavní cirkulační čerpadlo, které je umístěno vždy do chladnější větve smyčky. V případě poruchy je možno celou smyčku vyřadit z provozu uzavřením obou hlavních uzavíracích armatur. Způsob uspořádání je patrný z následujícího obrázku.



Obr. 2.2: Primární okruh jaderné elektrárny ve čtyřsmyčkovém uspořádání

3. Generace VVER

Diplomová práce se zabývá parním generátorem určeným pro jadernou elektrárnu s reaktorem třetí generace typu VVER. Tato kapitola je ve své první části věnována stručné historii těchto reaktorů, část druhá je konkrétněji zaměřena na blok VVER 640.

3.1 Historie reaktorů VVER

V dnešní době vyrábějí lehkovodní reaktory přes 80 % světové produkce jaderné energie. Koncepce reaktorů VVER (vodovodný energetický reaktor) je jedním z obecně uznávaných vývojových směrů lehkovodních reaktorů.

Projekt tohoto reaktoru s výkonem 200 MWe vznikl v roce 1956. Pro první jadernou elektrárnu (JE) využívající VVER bylo uvažováno několik míst. Nakonec byla zvolena elektrárna Novovoronež, kde byly následně postaveny reaktory všech generací VVER.

VVER-1 v JE Novovoronež byl připojen do sítě v roce 1964 a ukončil provoz v roce 1984, druhý blok fungoval v letech 1969 až 1990. Provozem se osvědčila technická proveditelnost a spolehlivost tohoto systému. Zároveň bylo zjištěno mnoho nedostatků v konstrukci a projektu zařízení, což byly velice důležité poznatky pro výstavbu dalších bloků VVER. Pro následný vývoj JE byly tyto získané znalosti důležité i pro náš stát.

Po výstavbě prvních dvou bloků JE Novovoronež následoval vznik reaktorů I. generace – VVER 440 Mwe . První blok této řady byl spuštěn v roce 1971 (JE Novovoronež – 3. blok) a do roku 1975 jich bylo v Sovětském svazu spuštěno dalších pět. V rámci mezinárodních dohod bylo do provozu uvedeno deset těchto reaktorů i mimo Sovětský svaz.

Pro tyto bloky VVER jsou využívány materiály a konstrukce, jež nemají sklon k rychlému zničení. Možné nebezpečné jevy jsou během provozu neustále monitorovány, takže je možno včasné zareagovat a zamezit možnému rozvoji havárie. Parametry zařízení VVER jsou voleny tak, aby zajistily pomalý rozvoj potenciální nehody, čímž je operátorům umožněno proniknout do aktivní zóny k jejich likvidaci.

V roce 1971 byl schválen dokument „Obecných ustanovení bezpečnosti jaderných elektráren“ a v témž roce se zahájila příprava projektu JE s VVER druhé generace v souladu s mezinárodními bezpečnostními přístupy. Zvýšená bezpečnost zařízení byla doplněna o systém s působností v rámci celé JE, jež zamezuje vzniku vážných havárií. První blok této řady (VVER 440) byl postaven ve Finsku v JE Loviisa a uveden do provozu v roce 1977. V Československu nahradily energetické bloky nové generace původně plánované bloky první řady.

V roce 1969 započal vývoj systému VVER 1000 (projekt B-187) pro pilotní 5. blok JE Novovoronež a byl uveden do provozu v roce 1980. Tento systém byl opět inovován novými technickými řešeními (kupříkladu byla poprvé použita aktivní zóna reaktoru s řídicími tyčemi ve formě svazků pohlcovačů ovládaných programem).

V roce 1978 došlo k zahájení přípravy systému VVER 1000 pro velkou řadu jaderných elektráren. Čtrnáct těchto energetických bloků bylo uvedeno do provozu v letech 1984 až 1993.

Reaktory VVER druhé generace jsou zastoupeny v mnoha zemích. Bloky s reaktory VVER 440 jsou kromě Ruska provozovány také ve Finsku, Maďarsku, České Republice, Slovensku a Ukrajině. Reaktory VVER 1000 jsou v JE v Rusku, Ukrajině a Bulharsku.

Druhá generace reaktorů zajistila bezpečnou výrobu jaderné energie a prokázala možnost stálé existence JE na mezinárodním trhu s energií.

V rámci dalšího rozvíjení bezpečnostních funkcí bylo rozhodnuto o výstavbě JE s energetickými bloky třetí generace – VVER 640 (Sosnovy Bor a Kola-5 v Rusku) a VVER 1000 (Novovoronež-6 v Rusku a JE v Číně a Indii). Před koncem 80. let byl také zpracován projekt VVER 440 na Kubě a VVER 1000 pro třetí blok Loviisy ve Finsku. Snaha byla zaměřena především na ještě vyšší bezpečnost a spolehlivost zařízení (např. dvouplášťová ochranná obálka nebo systémy odpovídající vyšší seismicitě).

Plán na využití reaktorů čtvrté generace je rozvržen až do roku 2030, kdy mnoho dnes provozovaných reaktorů bude dosluhovat. Vychází z doporučení Mezinárodní skupiny pro jadernou bezpečnost (INSAG). Projekty předpokládají zvyšující se spotřebu energie ve světě a vysokého podílu jaderných systémů kryjících tyto spotřeby. Hlavními cíli je: 1) zajistit trvale udržitelný rozvoj výroby energie splňující požadavky na čistotu ovzduší a minimalizovat množství jaderného odpadu; 2) jaderné systémy čtvrté generace musí být cenově výhodnější v porovnání s jinými zdroji energie a musí mít úroveň finančního rizika srovnatelnou s ostatními energetickými systémy.

3.2 Blok VVER 640

Technický projekt jaderné elektrárny VVER 640 zpracoval petrohradský Atomenergoprojekt ve spolupráci s Gidropressem a Kurčatkovským institutem v rámci státního programu „Ekologicky čistá energetika“. Projekt je součástí nové generace jaderných elektráren se středním elektrickým výkonem 640 MW a odpovídá současným bezpečnostním požadavkům. Elektrárna je vybavena reaktorem V 407, který zahrnuje většinu nových inherentních a pasivních bezpečnostních systémů.

Návrh byl kladně oceněn Mezinárodní komisí na konkursu na nejlepší návrh energetických bloků s hodnocením „doporučení – zdokonalený“ a byl podroben detailní expertize v německé GRS (Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH) s kladným výsledkem.

Úroveň bezpečnosti tohoto bloku je zvýšena při maximálním využití zkušeností z projektů VVER 440 a VVER 1000. Zabezpečení jaderné elektrárny je zajištěno v nejrůznějších havarijních situacích pasivními systémy. Také je snížena citlivost JE k chybám personálu či extrémním vnějším událostem.

Dalším vylepšením je technickoekonomický ukazatel paliva, optimalizace systému a zdokonalení aktivní zóny.

Schéma jaderné elektrárny VVER 640 je v příloze č. 2.

Technické údaje JE s reaktorem VVER 640:

Elektrický výkon	640	MWe
Tepelný výkon	1800	MWt
Účinnost bloku	33,3	%
Typ reaktoru	V 407	-
Životnost reaktoru	60	let
Počet smyček I.okruhu	4	-
Tlak páry v PG	7,06	MPa
Tlak páry na vstupu do turbíny	6,9	MPa
Tlak vody na výstupu z aktivní zóny	15,7	MPa
Teplota vody na vstupu do reaktoru	296	°C
Teplota vody na výstupu z reaktoru	327	°C
Otáčky turbíny	3000	min ⁻¹
Tlak v kondenzátoru	5,0	kPa
Obohacení paliva	3,6	%
Střední vyhoření	40,4	MWdní / kg (U)

Základní rysy, jimiž se projekt VVER 640 liší od svých předchůdců:

- Použití dvojitého kontejnmentu (vnitřní ocelové obálky z jejíhož povrchu se odvádí teplo a kontroluje se její těsnost za provozu).
- Zesílení betonových konstrukcí uvnitř obálky.
- Automatické odstavení a dochlazování reaktoru na bázi pasivních systémů pracujících i bez zásahu operátora.
- Kontrola těsnosti vnitřní ocelové obálky za provozu reaktoru.
- Možnost kompenzace reaktivity ve všech stavech (vč. neutráveného reaktoru bez boru v chladivu) do teploty 100 °C.
- Zvýšení účinnosti JE zvýšením nominálního tlaku páry na výstupu z parního generátoru na 7 MPa.

U bloků jsou použity technologie a systémy, jež se osvědčily u předchozích projektů VVER. Projektová životnost JE je 50 let. Radiační působení na obyvatelstvo je nižší než 0,1% přirozeného pozadí. Vyčištěné vody technologického cyklu JE jsou opětovně používány. Použité palivo je skladováno po dobu pěti let v kontejnmentu. Celý projekt zahrnuje možnost umístění bloku v různých klimatických podmínkách a předpokládá i možné přírodní jevy (např. zemětřesení).

4. Popis parního generátoru

Parní generátor (PG) je zařízení k výrobě páry, která vzniká prostřednictvím proudění teplonositele, jež v PG předá svou tepelnou energii sekundárnímu médiu a následně ochlazuje jaderný reaktor.

Hlavními charakteristikami parního generátoru jsou: parní a tepelný výkon, vstupní a výstupní teplota a tlak primárního média, teplota a tlak sekundárního média a čistota páry.

Tepelná účinnost charakterizuje tepelné ztráty do okolí. Ty nejsou veliké – pohybují se v rozmezí 1 až 2 % tepelného výkonu.

Stavba PG musí vyhovovat následujícím obecným požadavkům a kritériím:

- Zajistit projektovaný výkon, parametry páry a bezpečný provoz při různých režimech jaderné elektrárny.
- Všechny části musí mít vysokou spolehlivost a bezpečnost.
- Požadovaná životnost je minimálně 30 až 35 let, tedy 200 až 250 tis. provozních hodin.
- Spoje musí být dokonale těsné, aby byla vyloučena možnost proniknutí radioaktivního teplonositele do pracovní látky a naopak.
- PG je třeba navrhnout tak, abychom předešli vznikům korozních produktů.
- Konstrukce a koncepce PG musí dovolovat snadnou montáž, opravu, dokonalé vypuštění jeho primární i sekundární strany a snadný bezporuchový provoz.

Možných konstrukčních řešení parních generátorů je celá řada, což je dáno typem reaktoru a tedy i parametry primárního média, požadovaným tepelným výkonem, širokou možností volby jednotlivých konstrukčních elementů a parametry na straně sekundárního média.

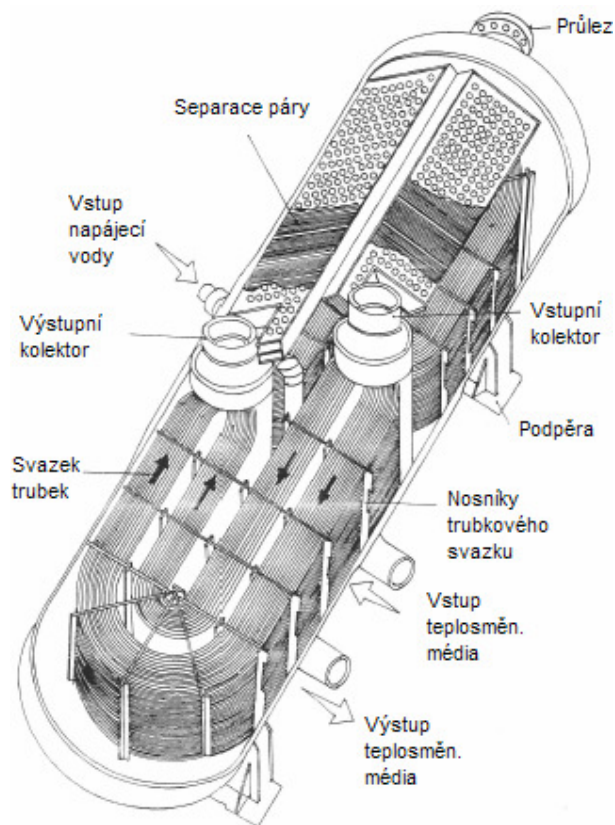
Horizontální parní generátor pro tlakovodní reaktor VVER:

Horizontální trubky tvaru U vedoucí teplotnosné médium ústí do vertikálních kolektorů umístěných ve střední části tělesa. Na své horní části jsou kolektory opatřeny mechanicky odnímatelnými víky, sloužícími pro případ kontroly či opravy. Svazky teplosměnných trubek jsou ponořeny pod hladinou sekundární vody.

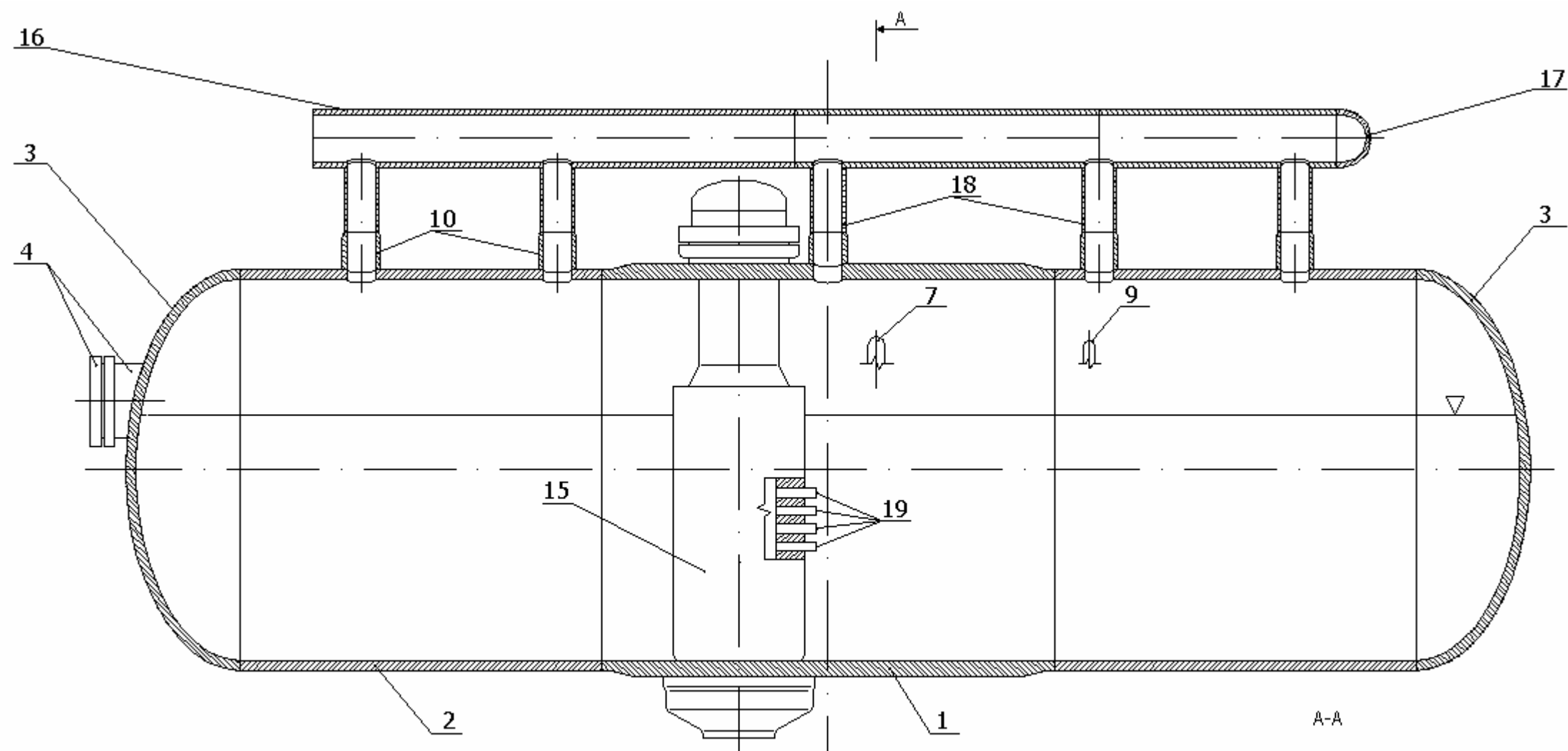
Sekundární napájecí voda je do tělesa přiváděna nátrubkem a rozváděna rozdělovacím kolektorem napájecí vody do teplejší poloviny svazků trubek (čímž se vyrovnává parní zatížení hladiny vody). Napájecí voda je přiváděna pod hladinu, což má za následek, že se nesníží parní výkon a suchost páry v prostoru nad hladinou vody. Cirkulace sekundární vody mezi trubkami svazku je přirozená.

V horní části tělesa jsou umístěny žaluziové separátory, ve kterých je pára uvolňující se z hladiny zbavována vlhkosti, načež vystupuje nátrubky do výstupního kolektoru nasycené páry.

Nepřetržitý odluh a odkal sekundární strany se provádí nátrubky umístěnými ve dně PG. Tímto se zajišťuje předepsaná kvalita páry.

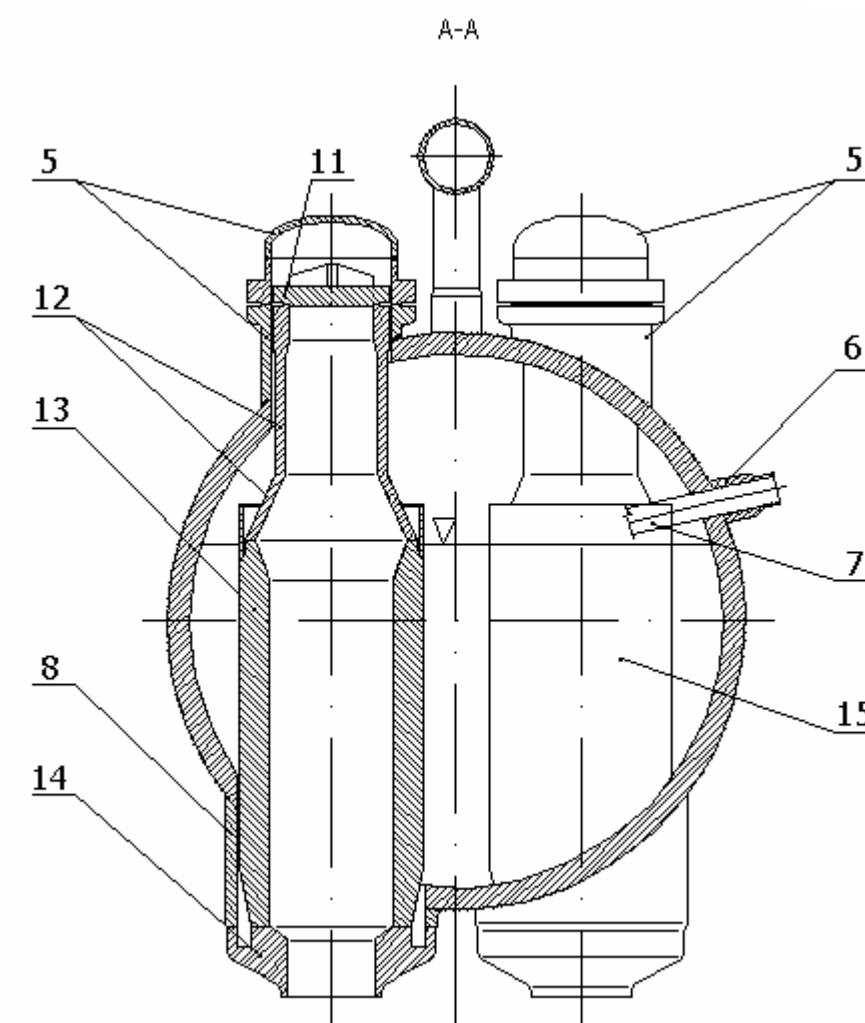


Obr. 4.1: Horizontální parní generátor



- 1) Střední kroužek pláště
- 2) Boční kroužek pláště
- 3) Eliptické dno pláště
- 4) Víko a nárubek průlezu parogenerátoru
- 5) Víko a nárubek průlezu II. okruhu
- 6) Nárubek napájecí vody
- 7) Trubka napájecí vody
- 8) Nárubek průměru 1105 mm
- 9) Nárubek přívodu havarijní vody
- 10) Nárubek páry na plášti

- 11) Víko vstupního kolektoru I. okruhu s radiálními žebry
- 12) Horní válcová a kuželová část vstupního kolektoru I. okruhu
- 13) Děrovaná válcová část vstupního kolektoru I. okruhu
- 14) Přechodový prstenec
- 15) Výstupní kolektor I. okruhu
- 16) Válcová část kolektoru páry
- 17) Kulové dno kolektoru páry
- 18) Nárubek kolektoru páry
- 19) Trubky kolektoru I. okruhu



Obr. 4.2: Celkové schéma horizontálního parního generátoru

5. Tepelný výpočet parního generátoru

Výpočet byl proveden v souladu s literaturou [2, 7, 8] a tabelované hodnoty odečteny prostřednictvím programu EES.

- Zadané parametry parního generátoru (PG):

Tepelný výkon PG	$Q_{PG} = 480 \text{ [MW]}$
Tlak syté páry	$p_{II.} = 7,06 \text{ [MPa]}$
Tlak v I. okruhu	$p_{I.} = 15,7 \text{ [MPa]}$
Teplota média v I. okruhu – vstup	$t_{I.1} = 327 \text{ [°C]}$
Teplota média v I. okruhu – výstup	$t_{I.2} = 296 \text{ [°C]}$
Účinnost PG	$\eta_{PG} = 99 \text{ [%]}$

- Střední teplota I. média:

Při výpočtech přestupu tepla z primárního média do stěny trubky uvažujeme jeho střední teplotu, tedy aritmetický průměr vstupní a výstupní teploty v daném počítaném úseku.

$$t_{I.St} = \frac{t_{I.1} + t_{I.2}}{2} \text{ [°C]} \quad (5.1)$$

$$t_{I.St} = \frac{327 + 296}{2} = 311,5 \text{ [°C]}$$

- Charakteristiky primárního média při jeho střední teplotě a tlaku 15,7 MPa:

Hustota	$\rho_{I.St} = 702,10 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$
Měrný objem	$v_{I.St} = 1,42 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$
Dynamická viskozita	$\eta_{I.St} = 8,41 \cdot 10^{-5} \text{ [kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$
Kinematická viskozita	$\nu_{I.St} = 1,198 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$
Prandtlovo kritérium	$Pr_{I.St} = 0,928 \text{ [1]}$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{I.St} = 0,524 \text{ [W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$

- Entalpie primárního média:

Entalpie primárního média – vstup	$i_{I.1} = 1496 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]}$
Entalpie primárního média – výstup	$i_{I.2} = 1315 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]}$

- Entalpie sekundárního média:

$$\text{Entalpie napájecí vody (t = 220°C)} \quad i_{NV} = 943,50 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]}$$

$$\text{Entalpie syté vody} \quad i' = 1270 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]}$$

$$\text{Entalpie syté páry} \quad i'' = 2772 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]}$$

5.1 Počet trubek a celková průtočná plocha primárního média

Teplosměnnou plochu tvoří trubky o rozměru $\varnothing 16 \times 1,5$ mm. Vnitřní průměr trubky je tedy 13 mm.

Celkový průtok primárního média, z něhož je odvozen potřebný počet trubek, je přímo úměrný tepelnému výkonu PG a nepřímo úměrný rozdílu vstupní a výstupní entalpie teplonosné vody.

- Zvolené parametry nutné pro další výpočty:

$$\text{Střední rychlost proudění primárního média} \quad w_{I,(t)} = 4,50 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

$$\text{Vnitřní průměr trubky} \quad d_1 = 13 \text{ [mm]}$$

$$\text{Vnější průměr trubky} \quad d_2 = 16 \text{ [mm]}$$

- Průtok I. média:

$$\dot{m}_I = \frac{Q_{PG}}{(i_{I,1} - i_{I,2}) \cdot \eta_{PG}} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_I = \frac{480000}{(1496 - 1315) \cdot 0,99} = 2678,72 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

- Celková teoretická průtočná plocha I. média:

$$S_{I,C(t)} = \frac{\dot{m}_I}{w_{I,(t)} \cdot \rho_{I,St}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.3)$$

$$S_{I,C(t)} = \frac{2678,72}{4,50 \cdot 702,10} = 0,848 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Průtočná plocha jedné trubky:

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [m^2] \quad (5.4)$$

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} = 1,33 \cdot 10^{-4} [m^2]$$

- Teoretický celkový počet trubek:

$$n_{tr(t)} = \frac{S_{I,C(t)}}{S_{tr}} \quad [1] \quad (5.5)$$

$$n_{tr(t)} = \frac{0,848}{0,000133} = 6388 \quad [1]$$

- Skutečný celkový počet trubek:

Z důvodu možného budoucího zaslepování (zapříčiněného např. poškozením) a zanášení trubek je vypočtené potřebné množství trubek navýšeno o 10 %, tedy:

$$n_{tr} = n_{tr(t)} \cdot 1,1 \quad [1] \quad (5.6)$$

$$n_{tr} = 6388 \cdot 1,1 = 7026 \quad [1]$$

- Skutečná celková průtočná plocha:

$$S_{I,C} = n_{tr} \cdot S_{tr} \quad [m^2] \quad (5.7)$$

$$S_{I,C} = 7026 \cdot 0,000133 = 0,933 \quad [m^2]$$

- Skutečná střední rychlost proudění I. média při jeho střední teplotě:

$$w_{I.} = \frac{\dot{m}_{I.}}{S_{I,C} \cdot \rho_{I.St}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (5.8)$$

$$w_{I.} = \frac{2678,72}{0,933 \cdot 702,10} = 4,09 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

S ohledem na různé délky trubek budou v jednotlivých sekcích respektive trubkách také různé rychlosti proudící vody. Vypočtená střední hodnota rychlosti je tedy aritmetickým průměrem odlišných rychlostí pro celý PG.

5.2 Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a vnitřní stěnou trubky

V následujících výpočtech je součinitel přestupu tepla určen na základě kritériálních rovnic, které se pro tepelnou konvekci upravují do tvaru:

$$Nu = f(Pe, Re, Gr)$$

Nu	Nusseltovo kritérium
Pe	Pecletovo kritérium
Re	Reynoldsovo kritérium
Gr	Grashofovo kritérium

Vztahy pro výpočet jednotlivých kritérií byly určeny z teorie podobnosti. Tato podobnost v tepelné konvekci znamená podobnost teplotních polí a tepelných toků.

Při výpočtu Reynoldsova kritéria je třeba stanovit tzv. charakteristický rozměr, kterým je v našem případě vnitřní průměr trubky. Velikost Reynoldsova kritéria nám určuje, zda se jedná o proudění laminární ($Re < 2320$) či turbulentní ($Re > 10^4$), na čemž je závislý následný způsob výpočtu kritéria Nusseltova.

Termofyzikální vlastnosti (kinematická viskozita, tepelná vodivost, měrné teplo) jsou obsaženy v Prandtlově čísle.

Fyzikální charakteristiky, které jsou v jednotlivých kritériích podobnosti obsaženy, jsou funkcí teploty. Při výpočtech je dodržována tzv. určovací teplota - aritmetický průměr teplot charakterizujících přestup tepla prouděním.

- Reynoldsovo číslo:

$$Re_{l.St} = \frac{w_{l.} \cdot d_l}{\nu_{l.St}} [1] \quad (5.9)$$

$$Re_{l.St} = \frac{4,09 \cdot 0,013}{1,198 \cdot 10^{-7}} = 443877,25 [1]$$

Reynoldsovo číslo má hodnotu vyšší než 10^4 , jedná se tedy o proudění turbulentní.

- Teplota syté páry při tlaku 7,06 Mpa:

$$\text{Odečteno: } t_{II.} = 286,4 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

- Teoretická střední teplota stěny trubky:

$$t_{trSt(t)} = \frac{t_{I.St} + t_{II.}}{2} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (5.10)$$

$$t_{trSt(t)} = \frac{311,5 + 286,4}{2} = 298,95 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

- Prandtlovo kritérium při střední teplotě trubky:

Pro výpočet Nusseltova kritéria bylo potřeba stanovit kritérium Prandtlovo Pr_{trSt} , odpovídající střední teplotě stěny trubky – ta byla určena jako aritmetický průměr střední teploty primárního média a teploty sekundárního média.

V pozdější fázi výpočtu je proveden kontrolní výpočet přesnosti této navržené střední teploty trubky.

$$\text{Odečteno: } Pr_{trSt} = 0,8749 \text{ [1]}$$

- Nusseltovo kritérium:

Jelikož je hodnota Reynoldsova čísla vyšší než 10^4 a jedná se o podélné omývání, využijeme vztahu:

$$Nu_{I.St} = 0,021 \cdot Re_{I.St}^{0,8} \cdot Pr_{I.St}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{I.St}}{Pr_{trSt}} \right)^{0,25} \text{ [1]} \quad (5.11)$$

$$Nu_{I.St} = 0,021 \cdot 443877,25^{0,8} \cdot 0,9275^{0,43} \cdot \left(\frac{0,9275}{0,8749} \right)^{0,25} = 679,69 \text{ [1]}$$

- Součinitel přestupu tepla na straně primárního média:

$$\alpha_{I.} = Nu_{I.St} \cdot \frac{\lambda_{I.St}}{d_1} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.12)$$

$$\alpha_{I.} = 679,69 \cdot \frac{0,5242}{0,013} = 27407,36 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

5.3 Součinitel přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a sekundárním médiem

- Výpočtová konstanta A:

Empirický vztah pro její určení odečten z literatury [7].

$$A = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (t_{II} - 100)} \quad [1] \quad (5.13)$$

$$A = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (286,4 - 100)} = 8,754 \quad [1]$$

- Součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média:

Pro výpočet součinitele přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a parovodní směsí je potřeba znát hodnotou hustoty tepelného toku - ta se nejdříve odhadne, a po následujících výpočtech je posouzena míra správnosti tohoto odhadu. Toleranční mez je 1%. Pakliže není odhad dostatečně přesný, iterujeme hodnotu tepelného toku až do momentu, kdy dosáhneme požadované přesnosti.

Střední tepelný tok stěnou je iterační metodou stanoven: $q_{St(t)} = 131430 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$\alpha_{II} = A \cdot q_{St(t)}^{0,7} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.14)$$

$$\alpha_{II} = 8,754 \cdot 131430^{0,7} = 33520,81 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

5.4 Střední logaritmická teplota

- Teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem:

$$\Delta t_1 = t_{I,1} - t_{II} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.15)$$

$$\Delta t_1 = 327 - 286,4 = 40,6 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem:

$$\Delta t_2 = t_{I,2} - t_{II} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.16)$$

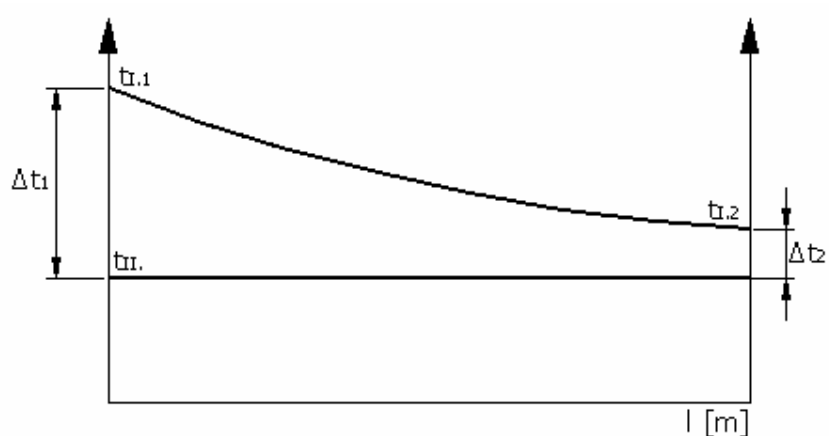
$$\Delta t_2 = 296 - 286,4 = 9,6 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Střední logaritmický teplotní spád:

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.17)$$

$$\Delta t_{\ln} = \frac{40,6 - 9,6}{\ln \frac{40,6}{9,6}} = 21,5 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Schématické znázornění průběhu teplot v primárním a sekundárním okruhu parního generátoru:

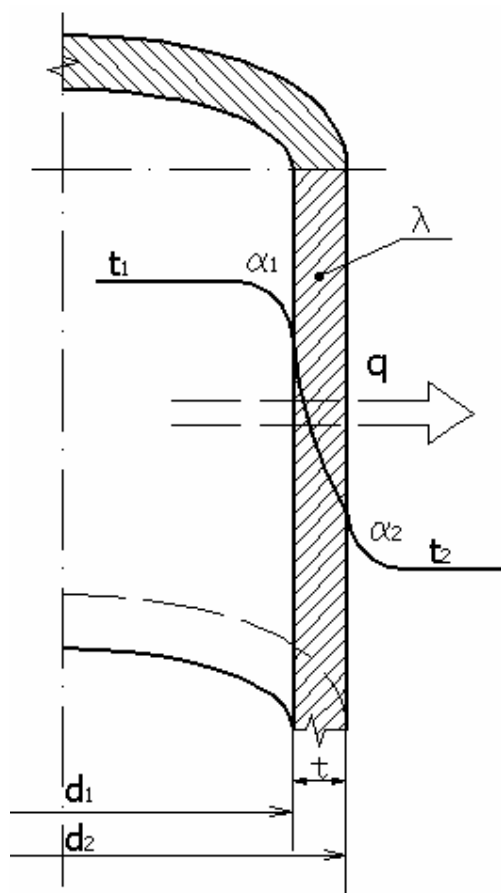


Horní křivka představuje průběh teploty primárního média po délce parního generátoru. Dolní úsečka znázorňuje teplotu parovodní směsi v tělese parního generátoru.

Obr. 5.1: Průběh teplot I. a II. média

5.5 Součinitel prostupu tepla

Pro teplosměnné trubky je zvolen materiál 08Ch18N10T, jehož součinitel tepelné vodivosti činí $\lambda_{tr} = 18,70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



Prostup tepla probíhá postupně konvekcí na vnitřní ploše trubky, kondukcí stěnou trubky o tepelné vodivosti λ a tloušťce t a konvekcí na vnější ploše trubky.

Přenos tepelného výkonu je omezován tepelnou bariérou představovanou odporem stěny trubky (obrácená hodnota tepelné vodivosti materiálu stěny) a tepelnými odpory k ní přilehlých přechodových pásem.

Obr. 5.2: Průběh teploty napříč stěny trubky

- Výsledný součinitel prostupu tepla mezi teplotonositelem a parovodní směsí:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{I.}} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{II.}}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.18)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{27407,36} \cdot \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2 \cdot 18,70} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{33520,81}} = 6113,65 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

- Měrný střední tepelný tok stěnou:

Tento výpočet je kontrolou dříve navržené hodnoty (kap. 5.3) hustoty tepelného toku, potřebné pro stanovení součinitele přestupu tepla α_{II} .

$$q_{St} = k \cdot \Delta t_{ln} \quad [W.m^{-2}] \quad (5.19)$$

$$q_{St} = 6113,65 \cdot 21,5 = 131430,30 \quad [W.m^{-2}]$$

- Relativní chyba volené hodnoty středního tepelného toku vzhledem k vypočtené:

$$\Delta q_{rel} = \left| \frac{q_{St(t)} - q_{St}}{q_{St}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.20)$$

$$\Delta q_{rel} = \left| \frac{131430 - 131430,30}{131430,30} \right| \cdot 100 = 0,0002 \quad \%$$

⇒ odchylka je zanedbatelná.

Kontrola navržené teploty stěny:

- Teplo sdělené 1m stěny trubky:

$$q_{lSt} = q_{St} \cdot d_2 \cdot \pi \quad [W.m^{-1}] \quad (5.21)$$

$$q_{lSt} = 131430 \cdot 0,016 \cdot \pi = 6606,39 \quad [W.m^{-1}]$$

- Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média:

$$t_{wl} = t_{l,st} - \frac{q_{lSt}}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_I \cdot d_1} \quad [^{\circ}C] \quad (5.22)$$

$$t_{wl} = 311,5 - \frac{6606,39}{\pi} \cdot \frac{1}{27407,36 \cdot 0,013} = 305,60 \quad [^{\circ}C]$$

- Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média:

$$t_{trII.} = t_{II.} + \frac{q_{lSt}}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_{II.} \cdot d_2} \quad [^{\circ}C] \quad (5.23)$$

$$t_{trII.} = 286,4 + \frac{6606,39}{\pi} \cdot \frac{1}{33520,81 \cdot 0,016} = 290,32 \quad [^{\circ}C]$$

- Střední teplota stěny trubky:

$$t_{trSt} = \frac{t_{trI.} + t_{trII.}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (5.24)$$

$$t_{trSt} = \frac{305,60 + 290,32}{2} = 297,96 \quad [^{\circ}C]$$

- Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky:

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{t_{trSt(t)} - t_{trSt}}{t_{trSt}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.25)$$

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{298,95 - 297,96}{297,96} \right| \cdot 100 = 0,33 \quad [\%]$$

⇒ odklon je přijatelný

5.6 Velikost teplosměnné plochy a střední délka trubky

Na základě celkového požadovaného tepelného výkonu parního generátoru (PG) a vypočtené měrné hustoty tepelného toku, je stanovena potřebná teplosměnná plocha, z níž je posléze odvozena celková délka trubek.

- Celková teplosměnná plocha:

$$S = \frac{Q_{PG}}{q_{St}} \quad [m^2] \quad (5.26)$$

$$S = \frac{480 \cdot 10^6}{131430} = 3652 \quad [m^2]$$

- Celková délka trubek PG:

$$L_{trC} = \frac{S}{\pi \cdot d_2} \text{ [m]} \quad (5.27)$$

$$L_{trC} = \frac{3652}{\pi \cdot 0,016} = 72656 \text{ [m]}$$

- Délka střední trubky:

$$L_{tr} = \frac{L_{trC}}{n_{tr}} \text{ [m]} \quad (5.28)$$

$$L_{tr} = \frac{72656}{7026} = 10,34 \text{ [m]}$$

5.7 Parní a tepelný výkon parního generátoru

- Výparné teplo vody:

$$l_v = i'' - i' \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.29)$$

$$l_v = 2772 - 1270 = 1502 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

- Parní výkon parního generátoru při teplotě napájecí vody 220°C:

$$G = \frac{Q_{PG}}{l_v + 1,01 \cdot (i' - i_{NV})} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.30)$$

$$G = \frac{480000}{1502 + 1,01 \cdot (1270 - 943,5)} = 262,2 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Skutečný tepelný výkon:

$$Q_{PGsk} = G \cdot (i'' - i_{NV}) \text{ [kW]} \quad (5.31)$$

$$Q_{PGsk} = 262,2 \cdot (2772 - 943,5) = 479571,8 \text{ [kW]}$$

- Kontrola vypočteného skutečného tepelného výkonu vzhledem k zadanému:

$$\Delta Q_{PGrel} = \left| \frac{Q_{PG} - Q_{PGsk}}{Q_{PGsk}} \right| \cdot 100 \quad (5.32)$$

$$\Delta Q_{PGrel} = \left| \frac{480000 - 479571,8}{480000} \right| \cdot 100 = 0,089 \text{ [%]}$$

⇒ odklon je vyhovující

6. Tepelné zatížení teplosměnné plochy po délce trubky

Výpočet byl proveden v souladu s literaturou [2, 7, 8] a tabelované hodnoty odečteny prostřednictvím programu EES. Pro ulehčení výpočtů byl použit tabulkový editor Excel.

Vzhledem k tomu, že podíl teplotních rozdílů $\Delta t_1/\Delta t_2$ je relativně velký (~4), je pro přesnější zjištění tepelného zatížení teplosměnná plocha rozdělena na několik úseků. Teplotní spád teplonositele $\Delta t_L = t_{L,1} - t_{L,2} = 327 - 296 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ je rozdělen na deset pásem – devět pásem po $3 \text{ }^\circ\text{C}$ a jedno $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Při výpočtech se předpokládá konstantní průtočné množství teplonosného primárního média parogenerátorem m_I všemi uvažovanými úseky a konstantní teploty napájecí vody t_{NV} ve všech úsecích. Postup výpočtu veličin pro jednotlivé úseky je stejný jako v předcházející kapitole.

Vybrané výsledné hodnoty zpřesněného úsekového tepelného výpočtu:

- Celkový parní výkon:

$$G = \Sigma G_i \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.1)$$

$$G = 27,51 + 27,51 + 26,06 + 26,06 + 26,06 + 24,61 + 24,61 + \\ + 24,61 + 23,16 + 31,85 = 262,04 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Celková potřebná teplosměnná plocha:

$$S = \Sigma S_i \text{ [m}^2] \quad (6.2)$$

$$S = 193 + 212 + 222 + 247 + 279 + 302 + 352 + 422 + 493 + 944 = 3667 \text{ [m}^2]$$

- Celková délka střední trubky:

$$L_{tr} = \Sigma L_{tri} \text{ [m]} \quad (6.3)$$

$$L_{tr} = 0,548 + 0,600 + 0,628 + 0,701 + 0,790 + 0,855 + 0,997 + \\ + 1,195 + 1,397 + 2,671 = 10,38 \text{ [m]}$$

Hodnoty veličin v jednotlivých pásmech jsou uspořádány v následujících tabulkách **6.1a – 6.3c**.

Název veličiny	Značka	Výpočet hodnoty / Odkaz	Jednotka
Průtok teplotonositele parním generátorem	$m_{I.}$	$\frac{Q_{PG}}{\Delta i_{I.} \cdot \eta_{PG}}$	$[kg.s^{-1}]$
Teplota teplotonositele na vstupu do pásma	$t_{I,1}$	Tepelný výpočet po délce trubky (str. 40)	$[^{\circ}C]$
Teplota teplotonositele na výstupu z pásma	$t_{I,2}$	Tepelný výpočet po délce trubky (str. 40)	$[^{\circ}C]$
Rozdíl teplot	$\Delta t_{I.}$	$t_1 - t_2$	$[^{\circ}C]$
Průměrná teplota teplotonositele v daném pásmu	$t_{I,st}$	$\frac{t_{I,1} + t_{I,2}}{2}$	$[^{\circ}C]$
Entalpie teplotonositele na vstupu do pásma	$i_{I,1}$	Tabelována	$[kJ.kg^{-1}]$
Entalpie teplotonositele na výstupu z pásma	$i_{I,2}$	Tabelována	$[kJ.kg^{-1}]$
Tepelný výkon daného pásma	Q	$\dot{m} \cdot \Delta i_{I.} \cdot \eta_{PG}$	$[MW]$
Teplota napájecí vody	t_{NV}	Zadána	$[^{\circ}C]$
Entalpie napájecí vody	i_{NV}	Tabelována	$[kJ.kg^{-1}]$
Teplota syté páry	$t_{II.}$	Tabelována	$[^{\circ}C]$
Výparné teplo	l_v	$i'' - i'$	$[kJ.kg^{-1}]$
Vnitřní průměr trubky	d_1	Navržena	$[m]$
Vnější průměr trubky	d_2	Navržena	$[m]$

Tab. 6.1a

Značka	1. pásmo	2. pásmo	3. pásmo	4. pásmo	5. pásmo
m_I	2678,72				
$t_{I,1}$	327	324	321	318	315
$t_{I,2}$	324	321	318	315	312
Δt_I	3	3	3	3	3
$t_{I,St}$	325,5	322,5	319,5	316,5	313,5
$i_{I,1}$	1496	1477	1458	1440	1422
$i_{I,2}$	1477	1458	1440	1422	1404
Q	50,39	50,39	47,73	47,73	47,73
t_{NV}	220				
i_{NV}	943,5				
t_{II}	286,4				
l_v	1502				
d_1	0,013				
d_2	0,016				

Tab. 6.1b

Značka	6. pásmo	7. pásmo	8. pásmo	9. pásmo	10. pásmo
m_L	2678,72				
$t_{L,1}$	312	309	306	303	300
$t_{L,2}$	309	306	303	300	296
Δt_L	3	3	3	3	4
$t_{L,St}$	310,5	307,5	304,5	301,5	298
$i_{L,1}$	1404	1387	1370	1353	1337
$i_{L,2}$	1387	1370	1353	1337	1315
Q	45,08	45,08	45,08	42,43	58,34
t_{NV}	220				
i_{NV}	943,5				
$t_{II.}$	286,4				
l_v	1502				
d_1	0,013				
d_2	0,016				

Tab. 6.1c

Název veličiny	Značka	Výpočet hodnoty / Odkaz	Jednotka
Entalpie syté vody (II. okruh)	i'	Tabelována	$[kJ.kg^{-1}]$
Parní výkon úseku	G	$\frac{Q_{PG}}{l_v + 1,01 \cdot (i' - i_{NV})}$	$[kg.s^{-1}]$
Hustota teplotní vody při střední teplotě a tlaku 15,7 MPa	$\rho_{I.St}$	Tabelována	$[kg.m^{-3}]$
Celková plocha průřezu trubek	$S_{I.C}$	$n_{tr} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$	$[m^2]$
Střední rychlost proudění teplotní vody	$w_{I.}$	$\frac{\dot{m}_{I.}}{S_{I.C} \cdot \rho_{I.St}}$	$[m.s^{-1}]$
Kinematická viskozita při střední teplotě	$\nu_{I.St}$	Tabelována	$[m^2.s^{-1}]$
Reynoldsovo číslo	$Re_{I.St}$	$\frac{w_{I.} \cdot d_1}{\nu_{I.St}}$	$[1]$
Součinitel tepelné vodivosti teplotní vody při střední teplotě	$\lambda_{I.St}$	Tabelována	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
Střední teplota stěny trubky	t_{trSt}	$\frac{t_{I.St} + t_{II.}}{2}$	$[^{\circ}C]$
Prandtlovo číslo při střední teplotě teplotní vody	$Pr_{I.St}$	Tabelována	$[1]$
Prandtlovo číslo při střední teplotě stěny trubky	Pr_{trSt}	Tabelována	$[1]$
Nusseltovo číslo	$Nu_{I.St}$	$0,021 \cdot Re_{I.St}^{0,8} \cdot Pr_{I.St}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{I.St}}{Pr_{trSt}} \right)^{0,25}$	$[1]$
Součinitel přestupu tepla na straně I. média	$\alpha_{I.}$	$Nu_{I.St} \cdot \frac{\lambda_{I.St}}{d_1}$	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
Tepelný odpor 1	R_I	$\frac{1}{\alpha_{I.}} \cdot \frac{d_2}{d_1}$	$[m^2.K.W^{-1}]$
Tepelný odpor 2	R_2	$\frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}$	$[m^2.K.W^{-1}]$

Tab. 6.2a

Značka	1. pásmo	2. pásmo	3. pásmo	4. pásmo	5. pásmo
i'	1270,0				
G	27,51	27,51	26,06	26,06	26,06
$\rho_{I,St}$	666,22	674,31	682,59	690,13	697,35
$S_{I,C}$	0,933				
w_I	4,31	4,26	4,21	4,16	4,12
$v_{I,St}$	$1,176 \cdot 10^{-7}$	$1,181 \cdot 10^{-7}$	$1,185 \cdot 10^{-7}$	$1,190 \cdot 10^{-7}$	$1,195 \cdot 10^{-7}$
$Re_{I,St}$	476748,65	469023,42	461715,77	454798,47	448139,16
$\lambda_{I,St}$	0,4862	0,4951	0,5036	0,5116	0,5193
t_{trSt}	305,95	304,45	302,95	301,45	299,95
$Pr_{I,St}$	1,035	1,005	0,980	0,958	0,939
Pr_{trSt}	0,901	0,895	0,889	0,883	0,878
$Nu_{I,St}$	769,78	746,02	725,28	706,72	689,92
α_I	28789,68	28412,03	28096,10	27812,01	27559,79
R_1	$4,275 \cdot 10^{-5}$	$4,332 \cdot 10^{-5}$	$4,381 \cdot 10^{-5}$	$4,425 \cdot 10^{-5}$	$4,466 \cdot 10^{-5}$
R_2	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$

Tab. 6.2b

Značka	6. pásmo	7. pásmo	8. pásmo	9. pásmo	10. pásmo
i'	1270,0				
G	24,61	24,61	24,61	23,16	31,85
$\rho_{I,St}$	704,23	711,24	717,88	724,11	731,53
$S_{I,C}$	0,933				
w_I	4,08	4,04	4,00	3,97	3,93
$v_{I,St}$	$1,200 \cdot 10^{-7}$	$1,205 \cdot 10^{-7}$	$1,210 \cdot 10^{-7}$	$1,216 \cdot 10^{-7}$	$1,223 \cdot 10^{-7}$
$Re_{I,St}$	441776,56	435642,92	429726,72	424017,20	417521,58
$\lambda_{I,St}$	0,5265	0,5335	0,5402	0,5465	0,5536
t_{trSt}	298,45	296,95	295,45	293,95	292,20
$Pr_{I,St}$	0,922	0,908	0,895	0,883	0,872
Pr_{trSt}	0,873	0,869	0,865	0,861	0,856
$Nu_{I,St}$	674,78	660,92	648,20	636,50	623,94
α_I	27328,40	27123,19	26935,27	26757,59	26570,35
R_1	$4,504 \cdot 10^{-5}$	$4,538 \cdot 10^{-5}$	$4,570 \cdot 10^{-5}$	$4,600 \cdot 10^{-5}$	$4,632 \cdot 10^{-5}$
R_2	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$

Tab. 6.2c

Název veličiny	Značka	Výpočet hodnoty / Odkaz	Jednotka
Tepelný odpor 3	R_3	$\frac{1}{\alpha_{II.}}$	$[m^2.K.W^{-1}]$
Navržený střední tepelný tok stěnou	$q_{St(t)}$	Odhad a následné upřesnění iterací	$[W.m^{-2}]$
Součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média	$\alpha_{II.}$	$\frac{1045}{3,3-0,0113(t_{II.}-100)} \cdot q_{St(t)}^{0,7}$	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
Teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem	Δt_1	$t_{I,1} - t_{II.}$	$[^{\circ}C]$
Teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem	Δt_2	$t_{I,2} - t_{II.}$	$[^{\circ}C]$
Střední logaritmický teplotní spád	Δt_{ln}	$\frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$	$[^{\circ}C]$
Celkový tepelný odpor	R_c	$R_1 + R_2 + R_3$	$[m^2.K.W^{-1}]$
Součinitel prostupu tepla	k	$\frac{1}{R_c}$	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
Střední tepelný tok stěnou	q_{St}	$k \cdot \Delta t_{ln}$	$[W.m^{-2}]$
Potřebná teplosměnná plocha	S	$\frac{Q}{q_{st}}$	$[m^2]$
Celková délka teplosměnných trubek	L_{trC}	$\frac{S}{\pi \cdot d_2}$	$[m]$
Střední délka trubky	L_{tr}	$\frac{L}{n_{tr}}$	$[m]$

Tab. 6.3a

Značka	1. pásmo	2. pásmo	3. pásmo	4. pásmo	5. pásmo
R_3	$1,848 \cdot 10^{-5}$	$1,971 \cdot 10^{-5}$	$2,113 \cdot 10^{-5}$	$2,280 \cdot 10^{-5}$	$2,481 \cdot 10^{-5}$
$q_{St(t)}$	260450	237600	215100	192950	171030
α_{II}	54104,75	50736,54	47323,48	43857,08	40306,86
Δt_1	40,60	37,60	34,60	31,60	28,60
Δt_2	37,60	34,60	31,60	28,60	25,60
Δt_{In}	39,08	36,08	33,08	30,08	27,07
R_c	$1,501 \cdot 10^{-4}$	$1,519 \cdot 10^{-4}$	$1,538 \cdot 10^{-4}$	$1,559 \cdot 10^{-4}$	$1,583 \cdot 10^{-4}$
k	6663,88	6585,10	6503,37	6415,02	6317,22
q_{St}	260429,88	237585,33	215113,98	192932,14	171021,67
S	193,48	212,08	221,90	247,42	279,12
L_{irC}	3849,07	4219,17	4414,65	4922,22	5552,83
L_{ir}	0,548	0,600	0,628	0,701	0,790

Tab. 6.3b

Značka	6. pásmo	7. pásmo	8. pásmo	9. pásmo	10. pásmo
R_3	$2,728 \cdot 10^{-5}$	$3,0340 \cdot 10^{-5}$	$3,449 \cdot 10^{-5}$	$4,014 \cdot 10^{-5}$	$5,057 \cdot 10^{-5}$
$q_{St(t)}$	149350	127960	106840	86010	61835
$\alpha_{II.}$	36658,28	32898,82	28996,27	24912,23	19773,90
Δt_1	25,60	22,60	19,60	16,60	13,60
Δt_2	22,60	19,60	16,60	13,60	9,60
Δt_{in}	24,07	21,06	18,06	15,05	11,48
R_c	$1,611 \cdot 10^{-4}$	$1,646 \cdot 10^{-4}$	$1,690 \cdot 10^{-4}$	$1,750 \cdot 10^{-4}$	$1,857 \cdot 10^{-4}$
k	6205,59	6075,23	5916,79	5715,34	5384,38
q_{St}	149361,51	127971,04	106848,33	86017,06	61834,89
S	301,84	352,29	421,93	493,29	943,52
L_{irC}	6004,86	7008,58	8394,10	9813,60	18770,76
L_{ir}	0,855	0,997	1,195	1,397	2,671

Tab. 6.3c

7. Materiály parního generátoru

Pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu zařízení je volba vhodného typu oceli, a to jak z hlediska konstituce, tak i z hlediska požadované úrovně fyzikálně a mechanicko-metalurgických vlastností, velmi důležitá.

Hlavním požadavkem kladeným na ocel vhodnou pro stavbu parních generátorů je její dosažení potřebné pevnostní úrovně za normální a zvýšené teploty a příslušná úroveň lomové houževnatosti při zabezpečení dobré svařitelnosti.

Pro stavbu parního generátoru jsou zvoleny již osvědčené typy oceli - 22 K, 20 K a 08Ch18N10T. Chemické složení těchto ocelí je v příloze č. 1.

Dovolená napětí ocelí:

Pro pevnostní výpočty jednotlivých částí parního generátoru je stanoven součinitel bezpečnosti $k_k = 1,5$. Z meze kluzu R_e daného materiálu a hodnoty součinitele bezpečnosti je vypočteno dovolené napětí dle vztahu:

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k_k} \text{ [Mpa]} \quad (7.1)$$

- Dovolené napětí pro materiál 22 K při teplotě 300°C:

$$\sigma_D = \frac{190}{1,5} = 126,67 \text{ [MPa]}$$

- Dovolené napětí pro materiál 20 K při teplotě 300 °C:

$$\sigma_D = \frac{177}{1,5} = 118 \text{ [MPa]}$$

- dovolené napětí pro materiál 08Ch18N10T při teplotě 350 °C:

$$\sigma_D = \frac{177}{1,5} = 118 \text{ [MPa]}$$

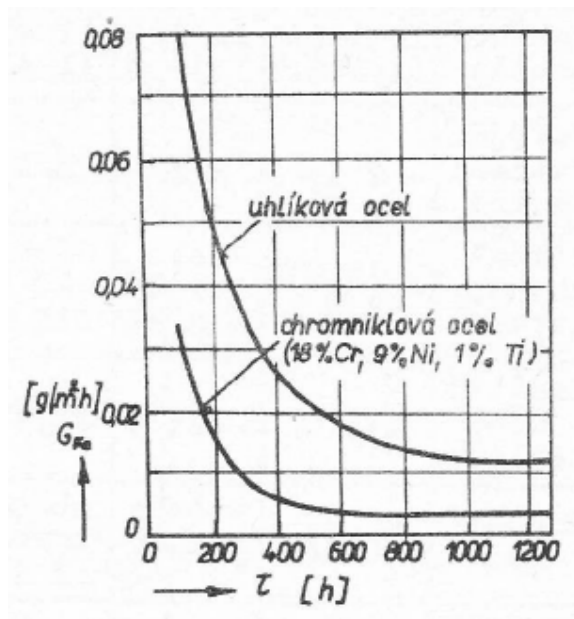
Použití těchto typů ocelí pro jednotlivé elementy PG a jejich mechanické vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Materiál	Část konstrukce	R_m [MPa]	R_e [MPa]	σ_D [MPa]
22 K plech	<ul style="list-style-type: none"> - Dno - Víko průlezu parního generátoru - Boční a střední kroužky - Eliptická část víka průlezu II. okruhu 	420	190	126,67
22 K výkovek	<ul style="list-style-type: none"> - Nátrubek průlezu PG - Příruba průlezu II. okruhu - Nátrubek napájecí a havarijní vody - Nátrubek průměru 1105 mm - Nátrubek páry na plášti 	420	186	124
20 K	<ul style="list-style-type: none"> - Kolektor páry - Nátrubky kolektoru páry - Dno kolektoru páry 	400	177	118
08Ch18N10T *	<ul style="list-style-type: none"> - Trubky výměníku - Kolektor I. okruhu - Víko kolektoru I. okruhu - Přejížděcí kroužek 	360	177	118
t = 300 °C				
* mechanické vlastnosti při teplotě t = 350 °C				

Tabulka 7.1: Materiály částí parního generátoru

Materiál trubek

Pro teplotosné trubky byl zvolen materiál 08Ch18N10T (ČSN 17 248) - nerezavící austenitická nikelchromovaná ocel, stabilizovaná titanem. Jedná se o strukturně stabilní materiál, který nevolňuje korozní produkty a tudíž se nezanášejí topné články. Na obr. 7.1 je přibližné srovnání rychlosti koroze uhlíkové oceli a nikelchromované austenitické oceli, přičemž je uvažován styk s kvalitní upravenou vodou pro primární okruhy.



Obr. 7.1: Porovnání rychlosti koroze uhlíkové a chromniklované oceli

Austenitické materiály jsou ovšem dražší a jejich tepelná vodivost je nižší než u uhlíkových ocelí. Za přítomnosti iontů chloru a kyslíku a také při zvýšené alkalitě mají tyto materiály náchylnost ke korozi, což je nedostatek nejpodstatnější. Pro spolehlivou funkci trubek je tedy třeba mít vysoce upravenou vodu s nízkým obsahem iontů Cl a nízkou alkalitou.

8. Návrh a pevnostní výpočet základních rozměrů parního generátoru

Výpočet jednotlivých částí parního generátoru je proveden v souladu s literaturou [10, 14, 15].

	V tělese	V trubkách
Tlak	7,06	15,7
Zeslabení koroze	$c_2 = 0,6$ [mm]	-
Teplota stěny (výpočtová)	300	350

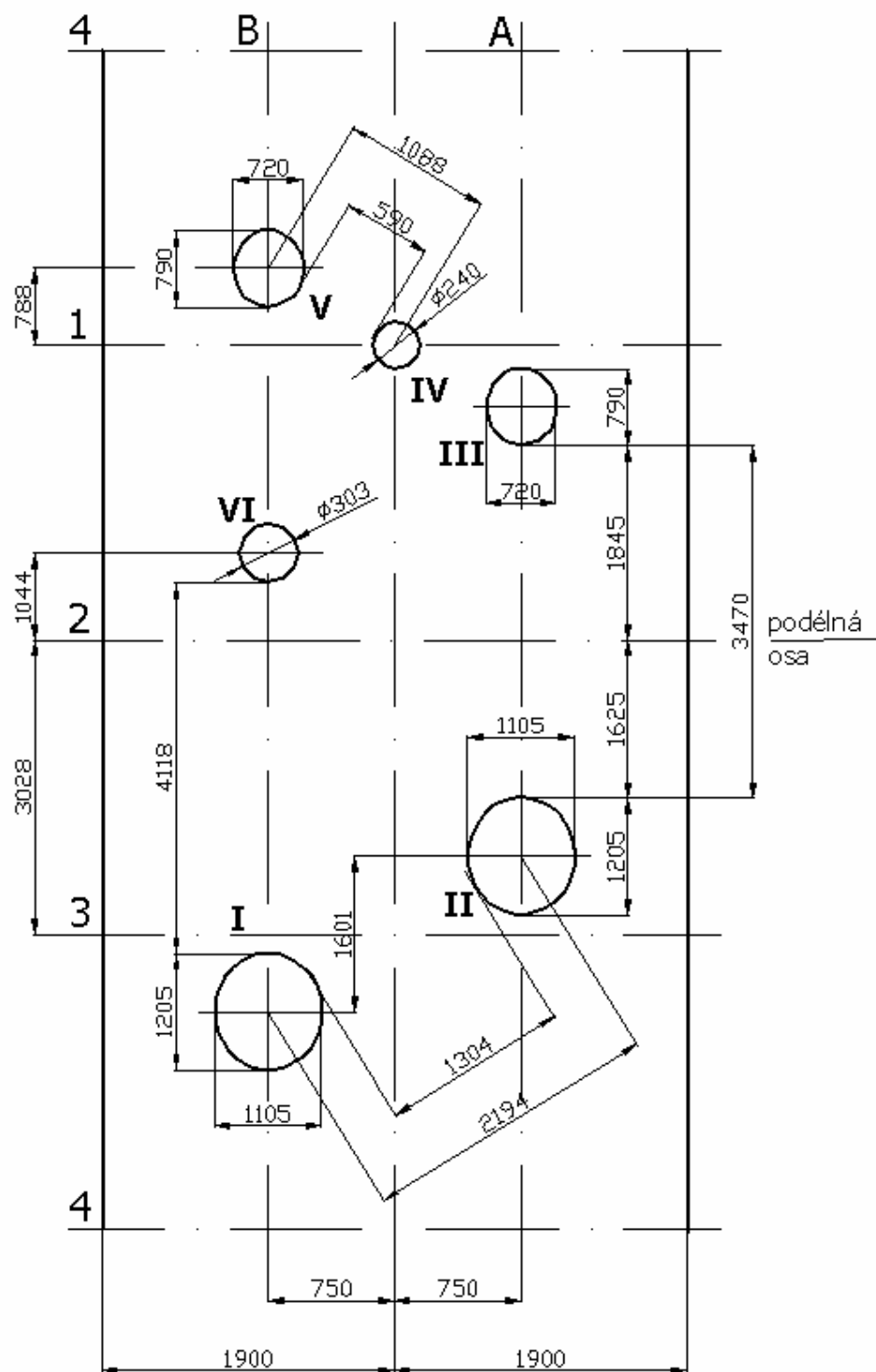
Tab. 8.1: Základní výpočtové parametry pro stanovení rozměrů parního generátoru

Přídavek na korozi je vzat $c_2 = 0,6$ mm u oceli 22 K a 20 K. U oceli 08Ch18N10T je vzato $c_2 = 0$ mm. U trubky na kolektor páry a trubky na nátrubky kolektoru páry je brán přídavek $c_1 = 1,3$ mm resp. $c_1 = 1,4$ mm.

8.1 Plášť parního generátoru

V návrhu pláště jsou stanoveny tloušťky těchto částí:

- Střední kroužky
- Boční kroužky
- Eliptická dna s průřezem PG
- Nátrubek průřezu sekundárního okruhu
- Eliptické víko průřezu sekundárního okruhu
- Nátrubek napájecí vody
- Nátrubek o průměru 1105 mm
- Nátrubek přívodu havarijní vody
- Nátrubek páry



Obr. 8.1: Rozvinutý plášť středního kroužku

8.1.1 Tloušťka stěny středního kroužku PG

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 145 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr stř. kroužku	$D = 3710 \text{ [mm]}$
Střední průměr středního kroužku	$D_s = 3855 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$

Střední kroužek je oslaben otvory (viz. **obr. 8.1**). Pevnostní koeficient středního kroužku je volen nejnižší z následujících.

V řadě A je koeficient pevnosti určen pro otvor II. Vzdálenost mezi sousedními okraji otvorů II a III je $L = 3470 \text{ mm}$.

- Podmínka osamělosti otvorů:

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \text{ [mm]} \quad (8.1)$$

$$2 \cdot \sqrt{3855 \cdot (145 - 0,6)} = 1492 < 3470 \text{ [mm]}$$

⇒ vyhovuje

- Koeficient pevnosti:

$$\varphi_1 = \frac{2}{2 + \frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}}} \text{ [1]} \quad (8.2)$$

$$\varphi_1 = \frac{2}{2 + \frac{1105}{\sqrt{3855 \cdot (145 - 0,6)}}} = 0,575 \text{ [1]}$$

- Podmínka platnosti vzorce pro koeficient pevnosti osamělého otvoru:

$$\frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} > 1 \quad (8.3)$$

$$\frac{1105}{\sqrt{3855 \cdot (145 - 0,6)}} = 1,481 > 1$$

⇒ vyhovuje

V řadě B je koeficient pevnosti určen pro otvor I. Vzdálenost mezi sousedními okraji otvorů I a VI je $L = 4118 \text{ mm}$.

- Podmínka osamělosti otvorů:

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \text{ [mm]} \quad (8.4)$$

$$2 \cdot \sqrt{3855 \cdot (145 - 0,6)} = 1492 < 4118 \text{ [mm]}$$

- Koeficient pevnosti:

$$\varphi_2 = \varphi_1 = 0,575$$

Koeficienty pevnosti v šikmém směru:

- a) Pro otvory I a II:

Vzdálenost mezi sousedními okraji otvorů je $L = 1304 \text{ mm}$.

- Podmínka osamělosti otvorů:

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \text{ [mm]} \quad (8.5)$$

$$2 \cdot \sqrt{3855 \cdot (145 - 0,6)} = 1492 > 1304 \text{ [mm]}$$

\Rightarrow nevyhovuje

- Koeficient pevnosti pro otvory I a II:

Potřebné rozměry pro výpočet (viz. **obr. 8.1**):

$$a = 1500 \text{ [mm]}$$

$$b = 1601 \text{ [mm]}$$

$$d = 1105 \text{ [mm]}$$

$$m = b/a = 1601/1500 = 1,067 \text{ [1]}$$

$$\varphi_3 = \frac{1 - \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right)^2}} \quad [1] \quad (8.6)$$

$$\varphi_3 = \frac{1 - \frac{1105}{1500} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+1,067^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{1,067^2}{1+1,067^2} \right)^2}} = 0,560 \quad [1]$$

b) Pro otvory III, IV a V:

Vzdálenost mezi sousedními okraji otvorů je $L = 590 \text{ mm}$.

- Podmínka osamělosti otvorů:

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \quad [mm] \quad (8.7)$$

$$2 \cdot \sqrt{3855 \cdot (145 - 0,6)} = 1492 > 590 \quad [mm]$$

⇒ nevyhovuje

- Koeficient pevnosti pro otvory III, IV a V:

Potřebné rozměry pro výpočet (viz. **obr. 8.1**):

$$d = 0,5 \cdot (d_3 + d_4) = 0,5 \cdot (720 + 240) = 480 \quad [mm]$$

$$d_3 = 720 \quad [mm] \quad (\text{rozměr otvorů III a V v podélném směru})$$

$$d_4 = 240 \quad [mm] \quad (\text{průměr otvoru IV})$$

$$a = 750 \quad [mm]$$

$$b = 788 \quad [mm]$$

$$m = b/a = 788/750 = 1,051 \quad [1]$$

$$\varphi_4 = \frac{1 - \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)^2}} \quad [1] \quad (8.8)$$

$$\varphi_4 = \frac{1 - \frac{480}{750} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+1,051^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{1,051^2}{1+1,051^2}\right)^2}} = 0,627 \quad [1]$$

Koeficient pevnosti pro ostatní otvory není nutné určovat.

- Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti pro otvory středního kroužku:

$$\varphi_0 = \frac{p \cdot [D + (s_N - c)]}{2 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma_D} \quad [1] \quad (8.9)$$

$$\varphi_0 = \frac{7,06 \cdot [3710 + (145 - 0,6)]}{2 \cdot (145 - 0,6) \cdot 126,67} = 0,744 \quad [1]$$

Protože vypočtené hodnoty koeficientů pevnosti nepřekračují minimální přípustnou mez, je nutné vyztužit otvory nátrubky.

Stanovení koeficientu pevnosti při vyztužení otvorů I a II nátrubky:

Navržené rozměry vyztužujícího nátrubku:

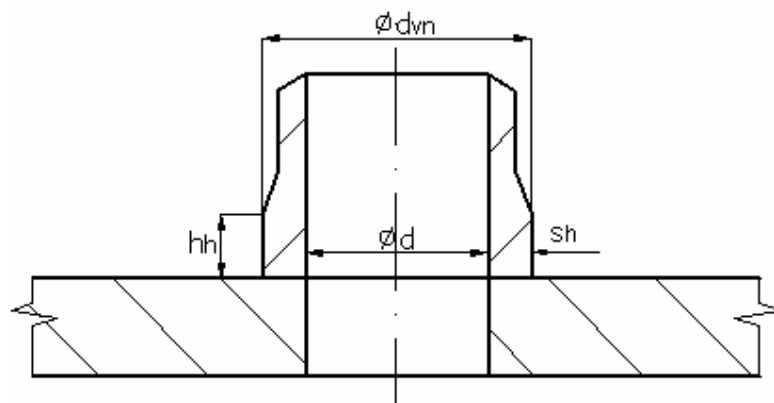
$$s_h = 130 \text{ [mm]}$$

$$c_h = 0,6 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 1365 \text{ [mm]}$$

$$h_h = 380 \text{ [mm]}$$

$$\varphi = \varphi_3 = 0,560 \text{ [1]}$$



Obr. 8.2: Nátrubek

- Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:

$$s_{oh} = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \sigma_D + p} \quad [mm] \quad (8.10)$$

$$s_{oh} = \frac{7,06 \cdot 1365}{2 \cdot 124 + 7,06} = 37,78 \quad [mm]$$

- Maximální výška zesílené části nátrubku:

$$h_{hmax} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \quad [mm] \quad (8.11)$$

$$h_{hmax} = \sqrt{(1365 - 130) \cdot (130 - 0,6)} = 399,76 \quad [mm]$$

- Plocha průřezu zesilující části nátrubku:

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \quad [mm^2] \quad (8.12)$$

$$f_h = 2 \cdot 380 \cdot (130 - 37,78 - 0,6) = 69629,02 \quad [mm^2]$$

- Skutečná plocha vyztužujícího průřezu nátrubku:

Dovolené napětí materiálu středního kroužku a nátrubku není stejné, proto pro plochu vyztužujícího průřezu platí:

$$f'_h = f_h \cdot \frac{\sigma_{Dn}}{\sigma_{Dk}} \quad [mm^2] \quad (8.13)$$

$$f'_h = 69629,02 \cdot \frac{124}{126,67} = 68161,35 \quad [mm^2]$$

- Koeficient pevnosti při vyztužení otvorů I a II:

$$\varphi' = \varphi + (1 - \varphi) \cdot \frac{f_h'}{(s_N - c) \cdot d} \quad [1] \quad (8.14)$$

$$\varphi' = 0,560 + (1 - 0,560) \cdot \frac{68161,35}{(145 - 0,6) \cdot 1105} = 0,748 \quad [1]$$

Stanovení koeficientu pevnosti při vyztužení otvorů III a V nátrubky:

Navržené rozměry vyztužujícího nátrubku:

$$s_h = 90 \text{ [mm]}$$

$$c_h = 0,6 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 900 \text{ [mm]}$$

$$h_h = 260 \text{ [mm]}$$

$$\varphi = \varphi_4 = 0,627 \quad [1]$$

- Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:

$$s_{oh} = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \sigma_D + p} \quad [mm] \quad (8.15)$$

$$s_{oh} = \frac{7,06 \cdot 900}{2 \cdot 124 + 7,06} = 24,91 \quad [mm]$$

- Maximální výška zesílené části nátrubku:

$$h_{h \max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \quad [mm] \quad (8.16)$$

$$h_{h \max} = \sqrt{(900 - 90) \cdot (90 - 0,6)} = 269,10 \quad [mm]$$

- Plocha průřezu zesilující části nátrubku:

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \quad [mm^2] \quad (8.17)$$

$$f_h = 2 \cdot 260 \cdot (90 - 24,91 - 0,6) = 33534 \quad [mm^2]$$

- Skutečná plocha vyztužujícího průřezu nátrubku:

$$f_h' = f_h \cdot \frac{\sigma_{Dn}}{\sigma_{Dk}} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (8.18)$$

$$f_h' = 33534 \cdot \frac{124}{126,67} = 32827 \text{ [mm}^2\text{]}$$

- Koeficient pevnosti při vyztužení otvorů III a V:

$$\varphi' = \varphi + (1 - \varphi) \cdot \frac{f_h'}{(s_N - c) \cdot d} \text{ [1]} \quad (8.19)$$

$$\varphi' = 0,627 + (1 - 0,627) \cdot \frac{32827}{(145 - 0,6) \cdot 720} = 0,745 \text{ [1]}$$

Koeficient pevnosti středního kroužku bereme nejnižší vypočtený, tedy:
 $\varphi' = 0,745$.

- Minimální nominální tloušťka stěny středního kroužku:

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi' \cdot \sigma_D - p} + c \text{ [mm]} \quad (8.20)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 3710}{2 \cdot 0,745 \cdot 126,67 - 7,06} + 0,6 = 144,77 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 145 \text{ mm} > s = 144,77 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (8.21)$$

$$\frac{145 - 0,6}{3710} = 0,039 < 0,3$$

\Rightarrow vyhovuje

8.1.2 Tloušťka stěny bočního kroužku PG

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 105 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr bočního kroužku	$D = 3710 \text{ [mm]}$
Střední průměr bočního kroužku	$D_s = 3815 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Průměr oslabujících otvorů	$d = 240 \text{ [mm]}$

Boční kroužek je oslaben otvory pro nátrubky kolektoru páry a nátrubek přívodu havarijní vody.

Vzájemná vzdálenost sousedních okrajů otvorů nátrubků kolektoru páry je $L_1 = 1403 \text{ mm}$ a vzdálenost okrajů otvorů nátrubku přívodu havarijní vody a kolektoru páry je $L_2 = 1544 \text{ mm}$.

- Podmínka osamělosti otvorů:

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \text{ [mm]} \quad (8.22)$$

$$2 \cdot \sqrt{3815 \cdot (105 - 0,6)} = 1262,20 < 1403 \text{ [mm]}$$

⇒ vyhovuje

- Koeficient pevnosti:

$$\varphi = \frac{1,6}{1,4 + \frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}}} \text{ [1]} \quad (8.23)$$

$$\varphi = \frac{1,6}{1,4 + \frac{240}{\sqrt{3815 \cdot (105 - 0,6)}}} = 0,899 \text{ [1]}$$

- Podmínka platnosti vzorce pro koeficient pevnosti osamělého otvoru:

$$\frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} > 0,2 \quad (8.24)$$

$$\frac{240}{\sqrt{3815 \cdot (105 - 0,6)}} = 0,380 > 0,2$$

⇒ vyhovuje

- Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti bočního kroužku:

$$\varphi_0 = \frac{p \cdot [D + (s_N - c)]}{2 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma_D} \quad [1] \quad (8.25)$$

$$\varphi_0 = \frac{7,06 \cdot [3710 + (105 - 0,6)]}{2 \cdot (105 - 0,6) \cdot 126,67} = 1,018 \quad [1]$$

Protože $\varphi_0 > \varphi$, je nutné vyztužení otvorů.

Stanovení koeficientu pevnosti při vyztužení otvorů nátrubky:

Navržené rozměry vyztužujícího nátrubku:

$$s_h = 75 \text{ [mm]}$$

$$c_h = 0,6 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 390 \text{ [mm]}$$

$$h_h = 150 \text{ [mm]}$$

- Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:

$$s_{oh} = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \sigma_D + p} \text{ [mm]} \quad (8.26)$$

$$s_{oh} = \frac{7,06 \cdot 390}{2 \cdot 124 + 7,06} = 10,80 \text{ [mm]}$$

- Maximální výška zesílené části nátrubku:

$$h_{h \max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \text{ [mm]} \quad (8.27)$$

$$h_{h \max} = \sqrt{(390 - 75) \cdot (75 - 0,6)} = 153,09 \text{ [mm]}$$

- Plocha průřezu zesilující části nátrubku:

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (8.28)$$

$$f_h = 2 \cdot 150 \cdot (75 - 10,80 - 0,6) = 19081 \text{ [mm}^2\text{]}$$

- Skutečná plocha vyztužujícího průřezu nátrubku:

$$f_h' = f_h \cdot \frac{\sigma_{Dn}}{\sigma_{Dk}} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (8.29)$$

$$f_h' = 19081 \cdot \frac{124}{126,67} = 18679 \text{ [mm}^2\text{]}$$

- Koeficient pevnosti pro výpočet nominální tloušťky stěny bočního kroužku:

$$\varphi' = \varphi \cdot \left[1 + \frac{f_h'}{2 \cdot s_N \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} \right] \text{ [1]} \quad (8.30)$$

$$\varphi' = 0,899 \cdot \left[1 + \frac{18679}{2 \cdot 105 \cdot \sqrt{3815 \cdot (105 - 0,6)}} \right] = 1,025 \text{ [1]}$$

- Minimální nominální tloušťka stěny bočního kroužku:

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi' \cdot \sigma_D - p} + c \text{ [mm]} \quad (8.31)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 3710}{2 \cdot 1,025 \cdot 126,67 - 7,06} + 0,6 = 104,29 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 105 \text{ mm} > s = 104,29 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (8.32)$$

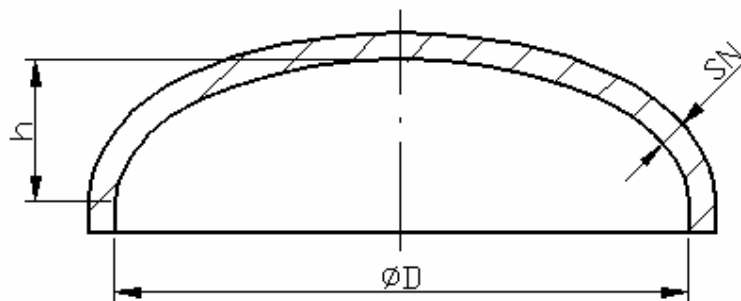
$$\frac{105 - 0,6}{3710} = 0,028 < 0,3$$

\Rightarrow vyhovuje

8.1.3 Tloušťka stěny eliptického dna PG

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 125 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr eliptického dna	$D = 3670 \text{ [mm]}$
Střední průměr	$D_s = 3795 \text{ [mm]}$
Hloubka eliptického dna	$h = 800 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$



Obr. 8.3: Eliptické dno PG

Dno je oslabeno otvorem pro průlez o průměru $d = 470 \text{ mm}$.

- Koeficient pevnosti:

$$\varphi = \frac{1,6}{1,4 + \frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}}} \quad [1] \quad (8.33)$$

$$\varphi = \frac{1,6}{1,4 + \frac{470}{\sqrt{3795 \cdot (125 - 0,6)}}} = 0,768 \quad [1]$$

- Podmínka platnosti vzorce pro koeficient pevnosti

$$\frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} > 0,2 \quad (8.34)$$

$$\frac{470}{\sqrt{3795 \cdot (125 - 0,6)}} = 0,684 > 0,2$$

⇒ vyhovuje

- Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti eliptického dna:

$$\varphi_0 = \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma_D} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} \quad [1] \quad (8.35)$$

$$\varphi_0 = \frac{7,06 \cdot 3670}{4 \cdot (125 - 0,6) \cdot 126,67} \cdot \frac{3670}{2 \cdot 800} = 0,943 \quad [1]$$

Protože $\varphi_0 > \varphi$, je nutné vyztužení otvorů.

Stanovení koeficientu pevnosti eliptického dna při vyztužení otvoru:

Navržené rozměry vyztužujícího nátrubku:

$$s_h = 105 \text{ [mm]}$$

$$c_h = 0,6 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 680 \text{ [mm]}$$

$$h_h = 240 \text{ [mm]}$$

- Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:

$$s_{oh} = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \sigma_D + p} \text{ [mm]} \quad (8.36)$$

$$s_{oh} = \frac{7,06 \cdot 680}{2 \cdot 124 + 7,06} = 18,82 \text{ [mm]}$$

- Maximální výška zesílené části hrdla nátrubku:

$$h_{h\max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \text{ [mm]} \quad (8.37)$$

$$h_{h\max} = \sqrt{(680 - 105) \cdot (105 - 0,6)} = 245,01 \text{ [mm]}$$

- Plocha průřezu zesilující části nátrubku:

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (8.38)$$

$$f_h = 2 \cdot 240 \cdot (105 - 18,82 - 0,6) = 41078 \text{ [mm}^2\text{]}$$

- Skutečná plocha vyztužujícího průřezu nátrubku:

$$f_h' = f_h \cdot \frac{\sigma_{Dn}}{\sigma_{Dd}} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (8.39)$$

$$f_h' = 41078 \cdot \frac{124}{126,67} = 40212 \text{ [mm}^2\text{]}$$

- Koeficient pevnosti pro výpočet nominální tloušťky stěny eliptického dna:

$$\varphi' = \varphi \cdot \left[1 + \frac{f_h'}{2 \cdot s_N \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} \right] \text{ [1]} \quad (8.40)$$

$$\varphi' = 0,768 \cdot \left[1 + \frac{40212}{2 \cdot 125 \cdot \sqrt{3795 \cdot (125 - 0,6)}} \right] = 0,948 \text{ [1]}$$

- Minimální nominální tloušťka stěny eliptického dna:

$$s = \frac{p \cdot D}{4 \cdot \varphi' \cdot \sigma_D} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} + c \text{ [mm]} \quad (8.41)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 3670}{4 \cdot 0,948 \cdot 127,67} \cdot \frac{3670}{2 \cdot 800} + 0,6 = 123,36 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 125 \text{ mm} > s = 123,36 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,1 \quad (8.42)$$

$$\frac{125 - 0,6}{3670} = 0,034 < 0,1$$

⇒ vyhovuje

8.1.4 Tloušťka stěny nátrubku průlezu PG

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 105 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 680 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1[1]$ (nátrubek je bez otvorů)

- Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku průlezu PG:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \text{ [mm]} \quad (8.43)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 680}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,06} + 0,6 = 19,42 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 105 \text{ mm} > s = 19,42 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.44)$$

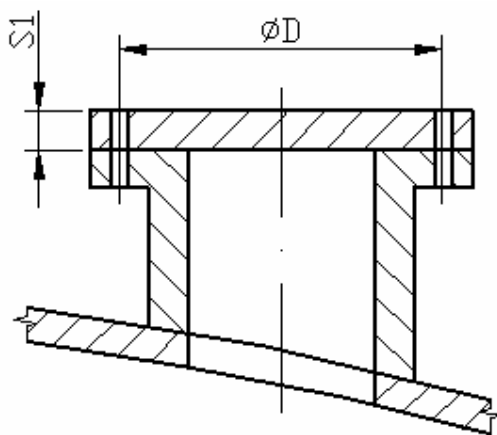
$$\frac{105 - 0,6}{680} = 0,154 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.1.5 Tloušťka deskového víka průlezu PG

Navržené parametry:

Nominální tloušťka víka	$s_1 = 115 \text{ [mm]}$
Rozteč šroubů	$D = 800 \text{ [mm]}$
Koeficient tvaru víka	$K = 0,6 [1]$
Koeficient oslabení vlivem otvorů	$K_0 = 1[1]$



Obr. 8.4: Nátrubek průřezu PG

- Minimální nominální tloušťka stěny víka:

$$s'_1 = \frac{K}{K_0} \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_D}} \quad [mm] \quad (8.45)$$

$$s'_1 = \frac{0,6}{1} \cdot 800 \cdot \sqrt{\frac{7,06}{126,67}} = 113,32 \quad [mm]$$

Navržená tloušťka $s_1 = 115 \text{ mm} > s'_1 = 113,32 \text{ mm}$ je vyhovující.

8.1.6 Tloušťka stěny nátrubku průřezu II. okruhu

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 90 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 900 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\phi = 1[1]$ (nátrubek je bez otvorů)

- Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku průřezu II. okruhu:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (8.46)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 900}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,06} + 0,6 = 25,51 \quad [mm]$$

Navržená tloušťka $s_N = 90 \text{ mm} > s = 25,51 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.47)$$

$$\frac{90 - 0,6}{900} = 0,10 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.1.7 Tloušťka stěny eliptického víka průřezu II. okruhu

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny $s_N = 36$ [mm]

Nominální vnitřní průměr eliptického dna $D = 720$ [mm]

Hloubka eliptického dna $h = 180$ [mm]

Přídavek k tloušťce stěny $c = c_2 = 0,6$ [mm]

Koeficient pevnosti $\phi = 1$ [1]

- Minimální nominální tloušťka stěny eliptického víka průřezu II. okruhu:

$$s = \frac{p \cdot D}{4 \cdot \phi \cdot \sigma_D} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} + c \text{ [mm]} \quad (8.48)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 720}{4 \cdot 1 \cdot 127,67} \cdot \frac{720}{2 \cdot 180} + 0,6 = 20,51 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 36$ mm $>$ $s = 20,51$ mm je vyhovující.

- Podmínky platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{h}{D} > 0,2 \quad (8.49)$$

$$\frac{180}{720} = 0,25 > 0,2$$

⇒ vyhovuje

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,1 \quad (8.50)$$

$$\frac{36 - 0,6}{720} = 0,049 < 0,1$$

⇒ vyhovuje

8.1.8 Tloušťka stěny nátrubku napájecí vody

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny

$$s_N = 19 \text{ [mm]}$$

Vnější průměr

$$D_v = 276 \text{ [mm]}$$

Přídavek k tloušťce stěny

$$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$$

Koeficient pevnosti

$$\varphi = 1[1]$$

- Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku napájecí vody:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \text{ [mm]} \quad (8.51)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 276}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,06} + 0,6 = 8,24 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 19 \text{ mm} > s = 8,24 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.52)$$

$$\frac{19 - 0,6}{276} = 0,067 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.1.9 Tloušťka stěny nátrubku o průměru 1105 mm

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 130 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 1365 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 [1]$

- Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku o průměru 1105 mm:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \text{ [mm]} \quad (8.53)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 1365}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,06} + 0,6 = 38,38 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 130 \text{ mm} > s = 38,38 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.54)$$

$$\frac{130 - 0,6}{1365} = 0,095 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.1.10 Tloušťka stěny nátrubku přívodu havarijní vody

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 24,5 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 160 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 [1]$

- Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku přívodu havarijní vody:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (8.55)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 160}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,06} + 0,6 = 5,03 \quad [mm]$$

Navržená tloušťka $s_N = 24,5 \text{ mm} > s = 5,03 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.56)$$

$$\frac{24,5 - 0,6}{160} = 0,15 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.1.11 Tloušťka stěny nátrubku páry

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny

$$s_N = 75 \quad [mm]$$

Vnější průměr

$$D_v = 390 \quad [mm]$$

Přídavek k tloušťce stěny

$$c = c_2 = 0,6 \quad [mm]$$

Koeficient pevnosti

$$\varphi = 1 \quad [1]$$

- Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku páry:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (8.57)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 390}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,06} + 0,6 = 11,40 \quad [mm]$$

Navržená tloušťka $s_N = 75 \text{ mm} > s = 11,40 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.58)$$

$$\frac{75 - 0,6}{390} = 0,191 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.2 Kolektor páry

Jsou navrženy a pevnostně ověřeny tyto části kolektoru páry:

- Válcová část
- Kulové dno
- Nátrubek páry

8.2.1 Tloušťka stěny válcové části kolektoru páry

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 32 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 457 \text{ [mm]}$
Střední průměr	$D_s = 425 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr kolektoru páry	$D = 393 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_1 + c_2 = 1,3 + 0,6 = 1,9 \text{ [mm]}$
Průměr otvoru	$d = 240 \text{ [mm]}$

Kolektor je v podélném směru oslaben otvory s různou roztečí. Otvory můžeme považovat za stejné. Nejmenší vzdálenost dvou sousedních okrajů otvorů je $L = 1393 \text{ mm}$.

- Podmínka osamělosti otvorů:

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \text{ [mm]} \quad (8.59)$$

$$2 \cdot \sqrt{425 \cdot (32 - 1,9)} = 226,21 < 1393 \text{ [mm]}$$

⇒ vyhovuje

- Koeficient pevnosti:

$$\varphi = \frac{2}{2 + \frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}}} \text{ [1]} \quad (8.60)$$

$$\varphi = \frac{2}{2 + \frac{240}{\sqrt{425 \cdot (32 - 1,9)}}} = 0,485 \text{ [1]}$$

- Podmínka platnosti vzorce pro koeficient pevnosti osamělého otvoru:

$$\frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} > 1 \quad (8.61)$$

$$\frac{240}{\sqrt{425 \cdot (32 - 1,9)}} = 2,12 > 1$$

⇒ vyhovuje

- Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti pro otvory kolektoru páry:

$$\varphi_0 = \frac{p \cdot [D + (s_N - c)]}{2 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma_D} \text{ [1]} \quad (8.62)$$

$$\varphi_0 = \frac{7,06 \cdot [393 + (32 - 1,9)]}{2 \cdot (32 - 1,9) \cdot 118} = 0,421 \text{ [1]}$$

Protože $\varphi_0 > \varphi$, vyztužování otvorů by nebylo nutné, ale přesto je vhodné otvory vyztužit nátrubky.

Navržené rozměry vyztužujícího nátrubku:

$$s_h = 16,5 \text{ [mm]}$$

$$c_h = c_1 + c_2 = 1,4 + 1,6 = 2,0 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 273 \text{ [mm]}$$

- Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:

$$s_{oh} = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \sigma_D + p} \text{ [mm]} \quad (8.63)$$

$$s_{oh} = \frac{7,06 \cdot 273}{2 \cdot 118 + 7,06} = 7,93 \text{ [mm]}$$

- Maximální výška zesílené části nátrubku:

$$h_{h\max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \text{ [mm]} \quad (8.64)$$

$$h_{h\max} = \sqrt{(273 - 16,5) \cdot (16,5 - 2,0)} = 61,0 \text{ [mm]}$$

- Plocha průřezu zesilující části:

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (8.65)$$

$$f_h = 2 \cdot 61 \cdot (16,5 - 7,93 - 2,0) = 801,54 \text{ [mm}^2\text{]}$$

- Koeficient pevnosti pro výpočet nominální tloušťky stěny kolektoru páry:

$$\varphi' = \varphi \cdot \left[1 + \frac{f_h}{2 \cdot s_N \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} \right] \text{ [1]} \quad (8.66)$$

$$\varphi' = 0,485 \cdot \left[1 + \frac{801,54}{2 \cdot 32 \cdot \sqrt{425 \cdot (32 - 1,9)}} \right] = 0,539 \text{ [1]}$$

- Minimální nominální tloušťka stěny kolektoru páry:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi' \cdot \sigma_D + p} + c \text{ [mm]} \quad (8.67)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 457}{2 \cdot 0,539 \cdot 118 + 7,06} + 1,9 = 25,93 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 32 \text{ mm} > s = 25,93 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.68)$$

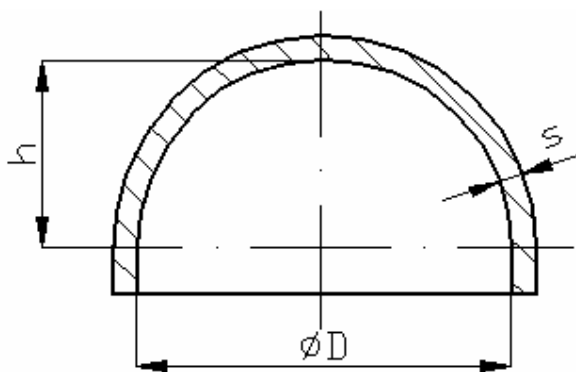
$$\frac{32 - 1,9}{457} = 0,066 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.2.2 Tloušťka stěny kulového dna kolektoru páry

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 32 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr	$D = 393 \text{ [mm]}$
Hloubka eliptického dna	$h = 196,5 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$



Obr. 8.5: Kulové dno kolektoru páry

- Minimální nominální tloušťka stěny kulového dna kolektoru páry:

$$s = \frac{p \cdot D}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_D} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} + c \text{ [mm]} \quad (8.69)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 393}{4 \cdot 1 \cdot 118} \cdot \frac{393}{2 \cdot 196,5} + 0,6 = 6,48 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 32 \text{ mm} > s = 6,48 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínky platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{h}{D} > 0,2 \quad (8.70)$$

$$\frac{196,5}{393} = 0,5 > 0,2$$

⇒ vyhovuje

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,1 \quad (8.71)$$

$$\frac{32 - 0,6}{393} = 0,08 < 0,1$$

⇒ vyhovuje

8.2.3 Tloušťka stěny nátrubku kolektoru páry

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 16,5 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 273 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_1 + c_2 = 1,4 + 1,6 = 2,0 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1[1]$

- Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku kolektoru páry:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \text{ [mm]} \quad (8.72)$$

$$s = \frac{7,06 \cdot 273}{2 \cdot 1 \cdot 118 + 7,06} + 2 = 9,93 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 16,5 \text{ mm} > s = 9,93 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka pro platnost vzorce pro tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.73)$$

$$\frac{16,5 - 2}{273} = 0,053 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.3 Kolektor I. okruhu

V návrhu základních rozměrů kolektoru jsou zahrnuty tyto části:

- Deskové víko průlezu I. okruhu
- Horní válcová část
- Kuželová část
- Děrovaná válcová část
- Válcová část v místě svaru přechodového prstence
- Teplosměnné trubky

8.3.1 Tloušťka stěny deskového víka průlezu I. okruhu

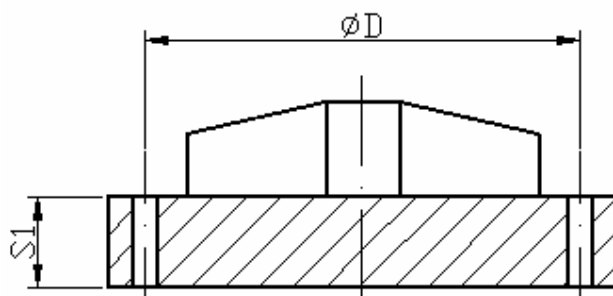
Navržené parametry:

Nominální tloušťka víka $s_1 = 130 \text{ [mm]}$

Rozteč šroubů $D = 620 \text{ [mm]}$

Koeficient tvaru víka $K = 0,6 \text{ [1]}$

Koeficient oslabení vlivem otvorů $K_0 = 1 \text{ [1]}$



Obr. 8.6: Deskové víko průlezu I. okruhu

- Minimální nominální tloušťka stěny víka:

$$s'_1 = \frac{K}{K_0} \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_D}} \text{ [mm]} \quad (8.74)$$

$$s'_1 = \frac{0,6}{1} \cdot 620 \cdot \sqrt{\frac{15,7}{118}} = 135,69 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_1 = 130 \text{ mm} < s'_1 = 135,69 \text{ mm}$, ale protože je víko vyztuženo radiálními žebry, je dostačující.

8.3.2 Tloušťka stěny horní válcové části kolektoru

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 70 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr	$D = 550 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = 0 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1[1]$

- Minimální nominální tloušťka stěny válcové části kolektoru:

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D - p} + c \text{ [mm]} \quad (8.75)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 550}{2 \cdot 1 \cdot 118 - 15,7} + 0 = 39,20 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 70 \text{ mm} > s = 39,20 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (8.76)$$

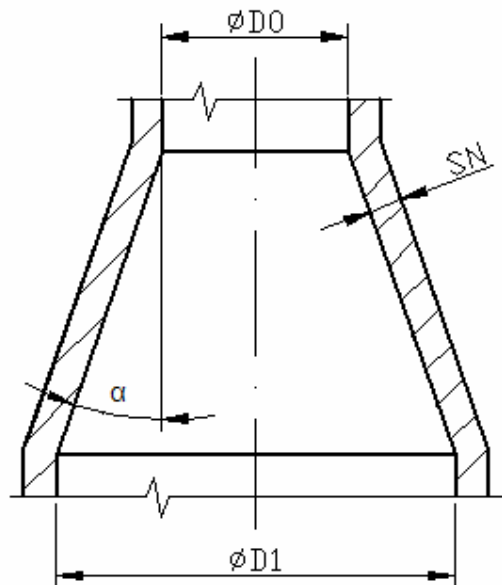
$$\frac{70 - 0}{550} = 0,127 < 0,3$$

⇒ vyhovuje

8.3.3 Tloušťka kuželové části kolektoru

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 70 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr 0	$D_0 = 550 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr 1	$D_1 = 866 \text{ [mm]}$
Úhel sklonu	$\alpha = 23,5 \text{ [}^\circ\text{]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = 0 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1[1]$



Obr. 8.7: Kuželová část kolektoru

- Minimální nominální tloušťka kuželové části kolektoru:

$$s = \frac{p \cdot D_1}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D \cdot \cos \alpha - p} + c \quad [mm] \quad (8.77)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 866}{2 \cdot 1 \cdot 118 \cdot \cos 23,5 - 15,7} + 0 = 67,74 \quad [mm]$$

Navržená tloušťka $s_N = 70 \text{ mm} > s = 67,74 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínky platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$0,1 > \frac{s_N - c}{D_1} > 0,05 \quad (8.78)$$

$$0,1 > \frac{70 - 0}{866} > 0,05$$

$$0,1 > 0,081 > 0,05$$

⇒ vyhovuje

$$\frac{D_o}{D_1} \leq 1 - 2,8 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{s_N - c}{D_1}\right) \cdot \frac{s_N - c}{D_1} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\cos \alpha}}} \quad (8.79)$$

$$\frac{550}{866} \leq 1 - 2,8 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{70 - 0}{866}\right) \cdot \frac{70 - 0}{866} \cdot \frac{\sin 23,5}{\sqrt{\cos 23,5}}}$$

$$0,635 \leq 0,655$$

⇒ vyhovuje

8.3.4 Tloušťka stěny děrované válcové části kolektoru

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny $s_N = 138 \text{ [mm]}$

Vnitřní průměr $D = 800 \text{ [mm]}$

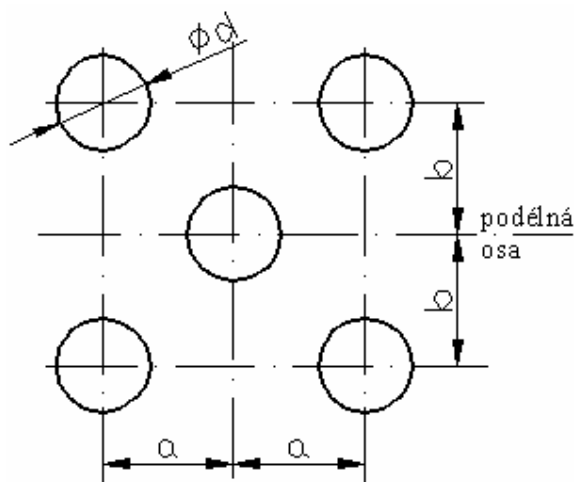
Válcová část je oslabena otvory pro teplosměnné trubky o rozměrech:

$a = 24 \text{ [mm]}$

$b = 15,50 \text{ [mm]}$

$d = 16,00 \text{ [mm]}$

$m = b/a = 15,5/24 = 0,646 \text{ [1]}$



Obr. 8.8: Otvory válcové části kolektoru

- Koeficient pevnosti pro šikmou řadu otvorů:

$$\varphi = \frac{1 - \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right)^2}} \quad [1] \quad (8.80)$$

$$\varphi = \frac{1 - \frac{16}{24} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+0,646^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{0,646^2}{1+0,646^2} \right)^2}} = 0,455 \quad [1]$$

- Minimální nominální tloušťka stěny děrované válcové části kolektoru:

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D - p} + c \quad (8.81)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 800}{2 \cdot 0,455 \cdot 118 - 15,7} + 0 = 136,98 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 138 \text{ mm} > s = 136,98 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (8.82)$$

$$\frac{138 - 0}{800} = 0,17 < 0,3$$

⇒ vyhovuje

8.3.5 Tloušťka stěny kolektoru v místě svaru přechodového prstence

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 90 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr	$D = 800 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = 0 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1[1]$

- Minimální nominální tloušťka stěny válce:

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D - p} + c \text{ [mm]} \quad (8.83)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 118 - 15,7} + 0 = 57,01 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 90 \text{ mm} > s = 57,01 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (8.84)$$

$$\frac{90 - 0}{800} = 0,113 < 0,3$$

⇒ vyhovuje

8.3.6 Tloušťka stěny teplosměnné trubky kolektoru

Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny $s_N = 1,5 \text{ [mm]}$

Vnější průměr $D_v = 16 \text{ [mm]}$

Přídavek k tloušťce stěny $c = 0 \text{ [mm]}$

Koeficient pevnosti $\varphi = 1[1]$

- Minimální nominální tloušťka stěny trubky:

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \text{ [mm]} \quad (8.85)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 16}{2 \cdot 1 \cdot 118 + 15,7} + 0 = 1,00 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 1,5 \text{ mm} > s = 1,0 \text{ mm}$ je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (8.86)$$

$$\frac{1,5 - 0}{16} = 0,09 < 0,2$$

⇒ vyhovuje

8.3.7 Tloušťka stěny válcové části přechodového prstence kolektoru

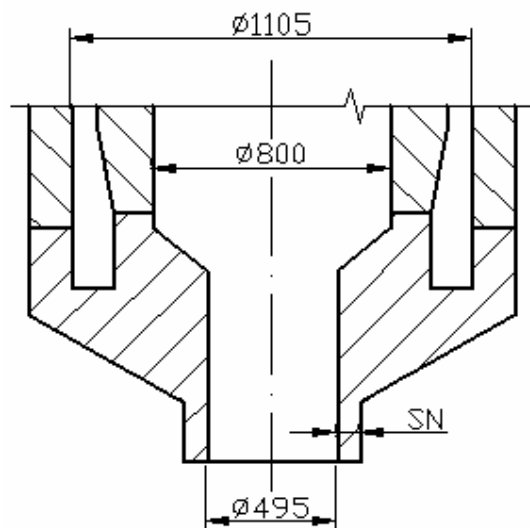
Navržené parametry:

Nominální tloušťka stěny $s_N = 50$ [mm]

Vnitřní průměr $D = 495$ [mm]

Přídavek k tloušťce stěny $c = 0$ [mm]

Koeficient pevnosti $\varphi = 1$ [1]



Obr. 8.9: Přechodový prstenec kolektoru

- Minimální nominální tloušťka stěny válcové části přechodového prstence:

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D - p} + c \text{ [mm]} \quad (8.87)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 495}{2 \cdot 1 \cdot 118 - 15,7} + 0 = 35,28 \text{ [mm]}$$

Navržená tloušťka $s_N = 50$ mm $>$ $s = 35,28$ mm je vyhovující.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (8.88)$$

$$\frac{50 - 0}{495} = 0,10 < 0,3$$

⇒ vyhovuje

8.4 Tabulka základních rozměrů parního generátoru

Název části	Tloušťka stěny [mm]
Střední kroužek pláště PG	145
Boční kroužek pláště PG	105
Eliptické dno pláště PG	125
Nátrubek průlezu PG	105
Deskové víko průlezu PG	115
Nátrubek průlezu II. okruhu	90
Eliptické víko průlezu II. okruhu	36
Nátrubek napájecí vody	19
Nátrubek o průměru 1105 mm	130
Nátrubek přívodu havarijní vody	24,5
Nátrubek páry na plášti PG	75
Válcová část kolektoru páry	32
Kulové dno kolektoru páry	32
Nátrubek kolektoru páry	16,5
Deskové víko kolektoru I. okruhu s radiálními žebry	130
Horní válcová část kolektoru I. okruhu	70
Kuželová část kolektoru I. okruhu	70
Děrovaná válcová část kolektoru I. okruhu	138
Válcová část kolektoru I. ok. v místě svaru přechodového prstence	90
Trubky kolektoru I. okruhu	1,5
Válcová část přechodového prstence v místě svaru ke kolenu o průměru 495 mm	50

9. Hydraulický výpočet I. okruhu parního generátoru

Výpočet se zabývá stanovením hydraulických ztrát v primárním okruhu PG při proudění teplonositele. Při průtoku média parním generátorem probíhají hydrodynamické děje, které závisí na značném množství různých činitelů. Jednak na teplotě, množství, hustotě a charakteru proudění teplonositele, jednak geometrické a konstrukční charakteristice protékaných kanálů.

Z fyzikálního hlediska se tyto ztráty rozdělují na místní ztráty a ztráty třením. Místní ztráty vznikají tam, kde dochází ke změně velikosti rychlosti (změnou velikosti průřezu) nebo směru proudu (zakřivení potrubí) nebo obou současně. Vlivem místních ztrát dochází k víření kapaliny.

Ztráty třením jsou způsobeny při proudění viskozitou kapaliny, jenž vyvolává tření kapaliny při obtékání ploch. Tyto ztráty jsou tím vyšší, čím je potrubí delší.

Při překonávání odporů při proudění kapaliny dochází k nezvratné, nežádoucí přeměně mechanické energie v energii tepelnou.

Znalost těchto tlakových ztrát je nutná pro výpočet potřebného příkonu motorů hlavních cirkulačních čerpadel.

Hydraulické ztráty primárního okruhu parního generátoru:

- Ztráta v příváděcím potrubí
- Ztráta ve vstupním kolektoru
- Ztráta na vstupu do střední řady teplosměnných trubek
- Ztráta při proudění v teplosměnných trubkách
- Ztráta změnou směru proudu o 180°
- Ztráta na výstupu z teplosměnných trubek
- Ztráta ve výstupním kolektoru
- Ztráta v odváděcím potrubí

9.1 Stanovení jednotlivých hydraulických ztrát

Výpočet proveden v souladu s literaturou [4, 5, 11].

9.1.1 Tlaková ztráta na vstupu do příváděcího kolektoru

Jedná se o místní ztrátu způsobenou rozšířením průtočného průřezu.

Vnitřní průměr příváděcího potrubí	$d_{pp} = 0,495 \text{ [m]}$
Vnitřní průměr příváděcího kolektoru	$d_{k1} = 0,8 \text{ [m]}$
Teplota teplonositele na vstupu do PG	$t_{l,1} = 327 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Hustota teplonositele při $t_{l,1} = 327 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_{l,1} = 661,8 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}$
Průtok I. média	$m_{l,1} = 2678,72 \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$

- Rychlost proudění teplonositele v příváděcím potrubí:

$$w_{pp} = \frac{\dot{m}_{l,1}}{\pi \cdot \frac{d_{pp}^2}{4} \cdot \rho_{l,1}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (9.1)$$

$$w_{pp} = \frac{2678,72}{\pi \cdot \frac{0,495^2}{4} \cdot 661,8} = 21,03 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

- Ztrátový součinitel na vstupu do příváděcího kolektoru:

$$\zeta_{k1} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{d_{pp}^2}{d_{k1}^2} \right) \text{ [1]} \quad (9.2)$$

$$\zeta_{k1} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,495^2}{0,8^2} \right) = 0,309 \text{ [1]}$$

- Tlaková ztráta na vstupu do příváděcího kolektoru:

$$p_{z1} = \zeta_{k1} \cdot \frac{w_{pp}^2}{2} \cdot \rho_{l,1} \text{ [Pa]} \quad (9.3)$$

$$p_{z1} = 0,309 \cdot \frac{21,03^2}{2} \cdot 661,8 = 45220 \text{ [Pa]}$$

9.1.2 Tlaková ztráta v příváděcím kolektoru

Výpočtová délka příváděcího kolektoru $l_{k1} = 1,825 \text{ [m]}$

- Rychlost proudění teplonositele v příváděcím kolektoru:

$$w_{k1} = \frac{\dot{m}_{l.}}{\pi \cdot \frac{d_{k1}^2}{4} \cdot \rho_{l.1}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.4)$$

$$w_{k1} = \frac{2678,72}{\pi \cdot \frac{0,8^2}{4} \cdot 661,8} = 8,05 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Ztrátový součinitel při proudění příváděcím kolektorem:

$$X_1 = 0,8 - 0,015 \cdot \frac{l_{k1}}{d_{k1}} \text{ [1]} \quad (9.5)$$

$$X_1 = 0,8 - 0,015 \cdot \frac{1,825}{0,8} = 0,766$$

- Tlaková ztráta v příváděcím kolektoru:

$$p_{z2} = X_1 \cdot \frac{w_{k1}^2}{2} \cdot \rho_{l.1} \text{ [Pa]} \quad (9.6)$$

$$p_{z2} = 0,766 \cdot \frac{8,05^2}{2} \cdot 661,8 = 16425 \text{ [Pa]}$$

9.1.3 Tlaková ztráta na vstupu do teplosměnných trubek

Celková průtočná plocha teplosměnných trubek $S_{l.C} = 0,933 \text{ [m}^2\text{]}$

- Střední rychlost teplonositele na vstupu do střední řady trubek:

$$w_{l.1} = \frac{\dot{m}_{l.}}{S_{l.C} \cdot \rho_{l.1}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.7)$$

$$w_{l.1} = \frac{2678,72}{0,933 \cdot 661,8} = 4,34 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Ztrátový součinitel na vstupu do střední řady trubek:

$$\text{Odečten: } \zeta_{tr1} = 0,5 \quad [1]$$

- Tlaková ztráta na vstupu do trubek:

$$p_{z3} = \zeta_{tr1} \cdot \frac{w_{l,1}^2}{2} \cdot \rho_{l,1} \quad [Pa] \quad (9.8)$$

$$p_{z3} = 0,5 \cdot \frac{4,34^2}{2} \cdot 661,8 = 3116 \quad [Pa]$$

9.1.4 Tlaková ztráta prouděním v teplosměnných trubkách

Střední teplota I. média	$t_{l,St} = 311,5 \quad [^{\circ}C]$
Hustota I. média při jeho střední teplotě	$\rho_{l,St} = 702,10 \quad [kg \cdot m^{-3}]$
Střední rychlost I. média v trubkách	$w_l = 4,09 \quad [m \cdot s^{-1}]$
Vnitřní průměr trubek	$d_1 = 0,013 \quad [m]$
Střední délka trubek	$L_{tr} = 10,38 \quad [m]$
Reynoldsovo číslo	$Re_{l,St} = 443877 \quad [1]$

- Součinitel tření při turbulentním proudění dle Drewa:

$$\lambda = 0,0056 + 0,05 \cdot (Re_{l,St})^{-0,32} \quad [1] \quad (9.9)$$

$$\lambda = 0,0056 + 0,05 \cdot (443877)^{-0,32} = 0,0064 \quad [1]$$

- Tlaková ztráta prouděním v trubkách:

$$p_{z4} = \lambda \cdot \frac{L_{tr}}{d_1} \cdot \frac{w_l^2}{2} \cdot \rho_{l,St} \quad [Pa] \quad (9.10)$$

$$p_{z4} = 0,0064 \cdot \frac{10,38}{0,013} \cdot \frac{4,09^2}{2} \cdot 702,10 = 30009 \quad [Pa]$$

9.1.5 Tlaková ztráta změnou směru proudu

- Ztrátové koeficienty:

$$A = f\left(\frac{R}{d_1}\right) = 0,03 \quad [1]$$

$$B = 1,4 \quad [1]$$

$$C = 1,0 \quad [1]$$

- Ztrátový součinitel změnou směru proudu:

$$\zeta_{zsp} = A \cdot B \cdot C \quad [1] \quad (9.11)$$

$$\zeta_{zsp} = 0,03 \cdot 1,4 \cdot 1,0 = 0,042 \quad [1]$$

- Tlaková ztráta změnou směru proudu:

$$p_{z5} = \zeta_{zsp} \cdot \frac{w_{L.}^2}{2} \cdot \rho_{L.St} \quad [Pa] \quad (9.12)$$

$$p_{z5} = 0,042 \cdot \frac{4,09^2}{2} \cdot 702,10 = 247 \quad [Pa]$$

9.1.6 Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek

Teplota teplotositele na výstupu do PG $t_{L.2} = 296 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$

Hustota teplotositele při $t_{L.2} = 296 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ $\rho_{L.2} = 735,3 \text{ } [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

- Střední rychlost teplotositele na výstupu ze střední řady trubek:

$$w_{L.2} = \frac{\dot{m}_{L.}}{S_{L.C} \cdot \rho_{L.2}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (9.13)$$

$$w_{L.2} = \frac{2678,72}{0,933 \cdot 735,3} = 3,90 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- Ztrátový součinitel na výstupu ze střední řady trubek:

$$\text{Odečten } \zeta_{tr2} = 1,0$$

- Tlaková ztráta na výstupu z trubek:

$$p_{z6} = \zeta_{r2} \cdot \frac{w_{l,2}^2}{2} \cdot \rho_{l,2} \quad [Pa] \quad (9.14)$$

$$p_{z6} = 1,0 \cdot \frac{3,90^2}{2} \cdot 735,3 = 5592 \quad [Pa]$$

9.1.7 Tlaková ztráta v odváděcím kolektoru

Vnitřní průměr odváděcího kolektoru $d_{k2} = 0,8 \text{ [m]}$

Výpočtová délka odváděcího kolektoru $l_{k2} = 1,825 \text{ [m]}$

- Rychlost proudění teplositele odváděcím kolektorem:

$$w_{k2} = \frac{\dot{m}_l}{\pi \cdot \frac{d_{k2}^2}{4} \cdot \rho_{l,2}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (9.15)$$

$$w_{k2} = \frac{2678,72}{\pi \cdot \frac{0,8^2}{4} \cdot 735,3} = 7,25 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- Ztrátový součinitel při proudění odváděcím kolektorem:

$$X_2 = 2,5 + 0,025 \cdot \frac{l_{k2}}{d_{k2}} \quad [1] \quad (9.16)$$

$$X_2 = 2,5 + 0,025 \cdot \frac{1,825}{0,8} = 2,56$$

- Tlaková ztráta v odváděcím kolektoru:

$$p_{z7} = X_2 \cdot \frac{w_{k2}^2}{2} \cdot \rho_{l,2} \quad [Pa] \quad (9.17)$$

$$p_{z7} = 2,56 \cdot \frac{7,25^2}{2} \cdot 735,3 = 49471 \quad [Pa]$$

9.1.8 Tlaková ztráta na výstupu z odváděcího kolektoru

Jedná se o místní ztrátu způsobenou zúžením průtočného průřezu.

Vnitřní průměr odváděcího potrubí $d_{op} = 0,495 \text{ [m]}$

- Rychlost proudění teplotní kapaliny v odváděcím potrubí:

$$w_{op} = \frac{\dot{m}_{l.}}{\pi \cdot \frac{d_{op}^2}{4} \cdot \rho_{l.2}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.18)$$

$$w_{op} = \frac{2678,72}{\pi \cdot \frac{0,495^2}{4} \cdot 735,3} = 18,9 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Ztrátový součinitel na výstupu z odváděcího kolektoru:

$$\zeta_{k2} = \left(1 - \frac{d_{op}^2}{d_{k2}^2}\right)^2 \text{ [1]} \quad (9.19)$$

$$\zeta_{k2} = \left(1 - \frac{0,495^2}{0,8^2}\right)^2 = 0,381$$

- Tlaková ztráta na výstupu z odváděcího kolektoru:

$$p_{z8} = \zeta_{k2} \cdot \frac{w_{op}^2}{2} \cdot \rho_{l.2} \text{ [Pa]} \quad (9.20)$$

$$p_{z8} = 0,381 \cdot \frac{18,9^2}{2} \cdot 735,3 = 50036 \text{ [Pa]}$$

9.2 Celková tlaková ztráta primárního okruhu parního generátoru

$$p_{zC} = p_{z1} + p_{z2} + p_{z3} + p_{z4} + p_{z5} + p_{z6} + p_{z7} + p_{z8} \quad [Pa] \quad (9.21)$$

$$p_{zC} = 45220 + 16425 + 3116 + 30009 + 247 + 5592 + 49471 + 50036 = 200116 \quad [Pa]$$

Výpočtem bylo zjištěno, že největší tlakové ztráty při proudění teplonositele jsou ve výstupním kolektoru parního generátoru. Nejmenší vliv na ztráty má změna směru proudění média v teplosměnných trubkách.

Hydraulický výpočet byl proveden zjednodušeně pro střední řadu trubek.

10. Návrh separace páry

Pro parní generátory jaderných centrál je nezbytné snižovat vlhkost ve vyrobené páře. Pro odstranění kapiček vody rozptýlených v páře slouží separátory. Tato zařízení mohou tvořit žaluziové odlučovačky, děrované stropní štíty nebo cyklóny. Správná funkce odlučovačů je podmíněna rozvedem proudu mokré páry přes zachytňné plochy, aby jejich účinek odpovídal výpočtovým a funkčním předpokladům. Rychlost páry nemá nikde překročit hodnotu, při které dochází k opětovnému strhávání kapek do hlavního proudu. Účinnost separátoru se definuje jako poměr oddělené vlhkosti ku obsahu vlhkosti vstupní páry.

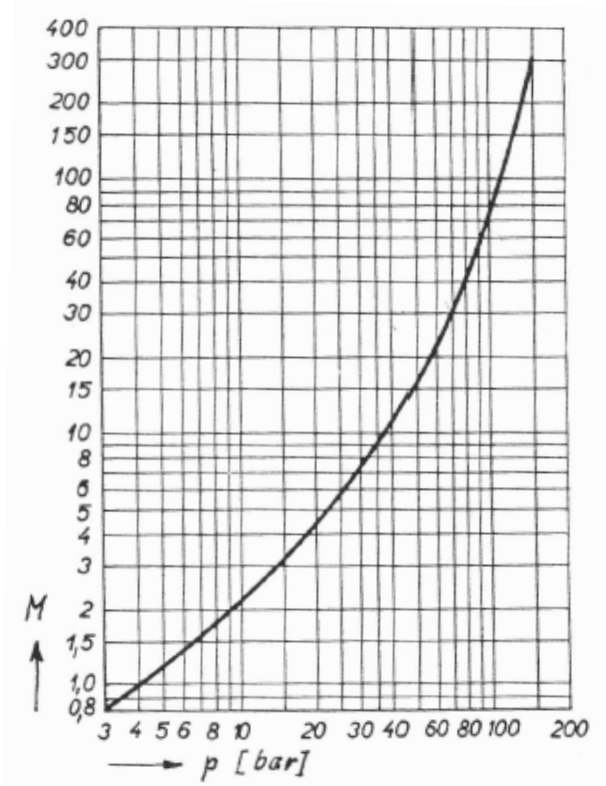
Vlhkost výstupní páry ze separačního zařízení $(1-x)$ závisí kromě funkce vlastního separátoru též na počáteční vlhkosti.

Vstupní vlhkost je závislá na zatížení hladiny (rychlosti páry), výšce parního prostoru, v níž může gravitačním účinkem docházet k sedimentaci a na vlastnostech vody a páry na mezní křivce (povrchové napětí, hustota, viskozita), závisících tedy na tlaku. Lze ji určit z empirického vztahu

$$(1-x) = 0,211 \cdot \frac{(w_h)^{2,76}}{h_p} \cdot M \quad [\%], \text{ kde}$$

„M“ je pomocná veličina závislá na vlastnostech páry (viz. **obr.10.1**), „ w_h “

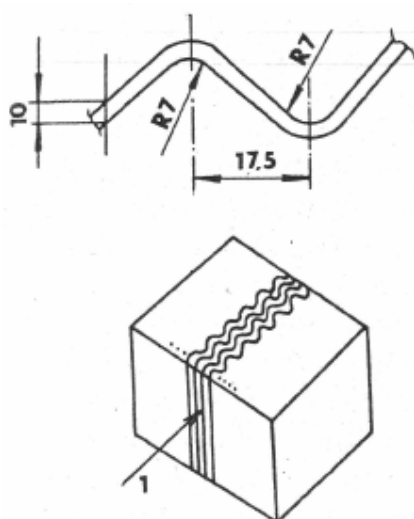
je rychlost páry vztažená na hladinu a „ h_p “ představuje výšku parního prostoru. Z tohoto vztahu je patrné, že s klesající rychlostí páry, vztažené na plochu hladiny (zatížení hladiny) a s rostoucí výškou parního prostoru, vlhkost páry klesá.



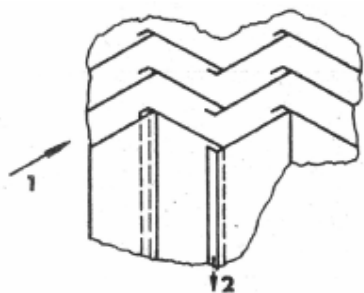
Obr. 10.1: Určení pomocného parametru M

Velmi důležitý prvek v celém procesu separace představuje rovnoměrné zatížení hladiny, na což je nutno dbát při konstrukci zřetel. Zrovnoměrnění zatížení hladiny lze dostatečně zlepšit vložením děrovaných plechů pod hladinu. Tento plech se umísťuje 50 až 75 mm pod hladinu a po straně zůstává mezera od stěny větší než 150 mm potřebná pro odtok vody. Velikost otvorů je ~ 10 mm. Plech má na okraji svislý rám o výšce 80 až 100 mm, díky němuž pod ním vzniká parní polštář.

10.1 Žaluziový separátor



Obr. 10.2: Schéma žaluziového separátoru s kruhovými oblouky

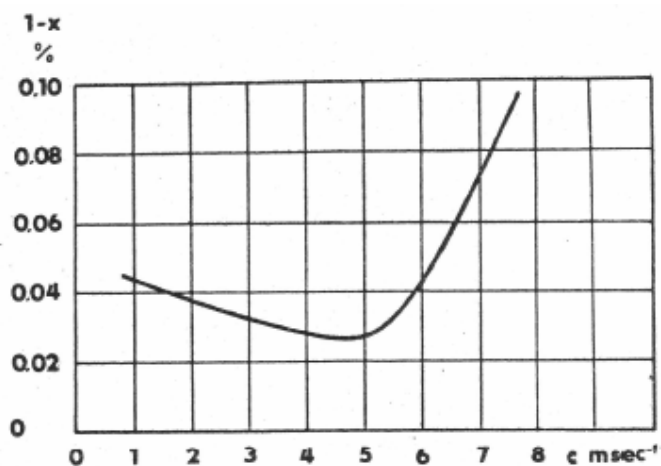


Obr. 10.3: Schéma žaluziového separátoru s hranatými plechy

Volba vhodného separačního zařízení závisí na samotném typu parního generátoru, pro který je separátor užit. Pro náš případ, tedy pro korpusový horizontální typ, se jako separační zařízení používá svislý žaluziový separátor, a to jako jediný aktivní separační prvek. Toto jednostupňové zařízení je možné použít z důvodu velmi nízkého měrného zatížení parního prostoru PG.

Žaluziový separátor je tvořen vertikálně orientovanými plechy s maximálním sklonem 30°. Plechy těchto separátorů tvoří buď kruhové oblouky (**obr. 10.2**) nebo hrany (**obr. 10.3**). Odseparovaná vlhkost vytváří vodní film, který stéká zpět.

Účinnost žaluziových separátorů nezávisí téměř vůbec na přítoku páry, obsahu vlhkosti v páře a disperzi vodních kapek. Závisí v podstatě jen na konstrukci samotného zařízení. Hraničním parametrem je kritická rychlost přítoku páry, při níž začne docházet k odtrhávání vodního filmu na žaluziích a obsah vody v páře začne narůstat. Na obrázku **10.4** je křivka zobrazující vliv rychlosti páry v separátoru na její výstupní vlhkosti při tlaku 0,3 MPa.



Obr. 10.4: Závislost výstupní vlhkosti na rychlosti páry v separátoru s vertikálně uspořádanými žaluziemi

Pracovní rychlost žaluziového separátoru se volí 0,2 až 0,7 z kritické rychlosti. Pro správnou činnost separátoru je požadována minimální výstupní vlhkost páry, snadný odvod odloučené vody bez možnosti zahlcení prostoru mezi žaluziemi a malá tlaková ztráta páry procházející soustavou žaluzií. Při navrhování separátorů je třeba také brát zřetel na požadavky technologického charakteru, jako například možnosti umístění, opravy či demontáže zařízení.

10.2 Výpočet žaluziové separace

Výpočet proveden v souladu s literaturou [2, 7, 13].

- Parní zatížení hladiny:

Plocha hladiny (při výšce 500 mm nad

horizontální osou PG)

$$S_h = 38,10 \text{ [m}^2\text{]}$$

Hustota syté vody

$$\rho' = 739,10 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

Hustota syté páry

$$\rho'' = 36,87 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

Parní výkon

$$G = 262,04 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]}$$

$$w_h = \frac{G}{S_h \cdot \rho''} [m \cdot s^{-1}] \quad (10.1)$$

$$w_h = \frac{262,04}{38,10 \cdot 36,87} = 0,19 [m \cdot s^{-1}]$$

Výpočtem bylo potvrzeno malé parní zatížení hladiny. Jeden separační stupeň (v podobě žaluziového odlučovače) je tedy dostačující.

- Povrchové napětí vody:

$$\sigma = 0,00714 \cdot g \cdot \left(\frac{\rho' - \rho''}{1000} \right)^4 [N \cdot m^{-1}] \quad (10.2)$$

$$\sigma = 0,00714 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{739,10 - 36,87}{1000} \right)^4 = 0,017 [N \cdot m^{-1}]$$

- Vstupní vlhkost páry:

Průměrná výška parního prostoru $h_p = 0,9 [m]$

Pomocný parametr (odečteno-**obr. 10.1**) $M = 30 [1]$

$$(1 - x) = 0,211 \cdot \frac{w_h^{2,76}}{h_p^{2,3}} \cdot M [1] \quad (10.3)$$

$$(1 - x) = 0,211 \cdot \frac{0,187^{2,76}}{0,90^{2,3}} \cdot 30 = 0,079 [1]$$

, z čehož plyne, že suchost je $x = 1 - 0,079 = 0,921 [1]$

- Kutateladzeho kritérium:

Navržené rozměry:

Výška žaluzie	$h_z = 0,94 \text{ [m]}$
Rozteč žaluzií	$t_z = 0,01 \text{ [m]}$
Rozvinutá šířka žaluzie	$b_z = 0,160 \text{ [m]}$
Polovina úhlu zakřivení toku páry	$\alpha = 48 \text{ [°]}$
Parametr charakterizující max. zatížení	$C = 2,2 \text{ [1]}$
Vstupní vlhkost	$(1-x) = 0,079 \text{ [1]}$

$$Ku = C - 1,69 \cdot \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h_z \cdot t_z}{b_z} \right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \text{ [1]} \quad (10.4)$$

$$Ku = 2,2 - 1,69 \cdot \left(\frac{0,079}{0,921} \right)^{0,56} \cdot \left(\frac{0,94 \cdot 0,01}{0,160} \right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos 48^\circ} = 1,89$$

- Kritická rychlost:

$$w_{kr} = \frac{Ku \cdot \sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}}{\sqrt{\rho'}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.5)$$

$$w_{kr} = \frac{1,89 \cdot \sqrt[4]{9,81 \cdot 0,017 \cdot (739,10 - 36,78)}}{\sqrt{36,78}} = 1,03 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Doporučená vstupní rychlost páry do separátoru:

$$w_{sep(dop)} = (0,2 \div 0,7) \cdot w_{kr} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.6)$$

$$w_{sep(dop)} = (0,2 \div 0,7) \cdot 1,03 = 0,21 \div 0,72 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Průtočná plocha separátoru:

$$S_{sep(dop)} = \frac{G}{w_{sep(dop)} \cdot \rho''} \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.7)$$

$$S_{sep(dop)} = \frac{262,04}{(0,21 \div 0,72) \cdot 36,87} = 9,87 \div 33,84 \text{ [m}^2\text{]}$$

S ohledem na navržené rozměry a geometrii tělesa parního generátoru je průtočná plocha žaluziového separátoru zvolena $S_{sep} = 17 \text{ m}^2$. Celý separátor je rozdělen na dva díly (tedy $2 \times 8,5 \text{ m}^2$), které jsou vedle sebe umístěny s malým sklonem v horní části nádoby PG před vstupem páry do nátrubků kolektoru páry (viz. výkres parního generátoru).

- Pracovní vstupní rychlost páry do separátoru:

$$w_{sep} = \frac{G}{S_{sep} \cdot \rho''} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (10.8)$$

$$w_{sep} = \frac{262,04}{17 \cdot 36,87} = 0,42 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Shrnutí základních rozměrů žaluziového separátoru:

Průtočná plocha separátorů	$S_{sep} = 17 \text{ [m}^2\text{]}$
Výška žaluzie	$h_z = 0,94 \text{ [m]}$
Délka separátoru	$l_{sep} = 9 \text{ [m]}$
Rozteč žaluzí	$t_z = 0,01 \text{ [m]}$
Rozvinutá šířka žaluzie	$b_z = 0,160 \text{ [m]}$

10.3 Hydraulický výpočet žaluziového separátoru:

Koeficient odporu žaluzie	$\zeta_z = 9,78 \text{ [1]}$
Hustota vstupující mokré páry ($x = 0,921$)	$\rho_{mp} = 39,88 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$

- Tlaková ztráta v separátoru

$$p_{Zsep} = \zeta_z \cdot \frac{w_{sep}^2}{2} \cdot \rho_{mp} \quad [Pa] \quad (10.9)$$

$$p_{Zsep} = 9,78 \cdot \frac{0,42^2}{2} \cdot 39,88 = 34,40 \quad [Pa]$$

Tlaková ztráta je zanedbatelná, takže tlak páry za separátorem lze považovat za nezměněný.

11. Závěr a shrnutí dosažených výsledků

Práce se zabývá konstrukčním návrhem horizontálního parního generátoru o tepelném výkonu 480 MW pro jadernou elektrárnu VVER 640 MWe. Tento parní generátor je umístěn ve čtyřsmýčkovém uspořádání primárního okruhu bloku a vyrábí sytou páru o tlaku 15,7 MPa a teplotě 286 °C.

Pro požadované energetické parametry byla vypočtena celková teplosměnná plocha 3667 m², která je tvořena ze 7026 trubek tvaru „U“ o střední délce 10,4 m. Podpěrný systém teplotnosných trubek zaručuje dostatečnou schopnost teplotních dilatací a zamezuje vibracím.

Primární médium o celkovém hmotnostním toku 2679 kg/s sníží při průtoku trubkami parního generátoru svou teplotu o 31 °C, přičemž střední logaritmický teplotní spád mezi ním a sytou parou je 21,5 °C. Parní výkon činí 262 kg/s.

Tlakovou nádobu parního generátoru tvoří dva střední kroužky o tloušťce stěny 145 mm a čtyři boční kroužky o tloušťce stěny 105 mm. Eliptická dna o tloušťce 125 mm nádobu uzavírají. V jednom z nich je průlez o průměru 470 mm. Pro odvod páry je podél horní části nádoby pět nátrubků o vnitřním průměru 240 mm, ty ústí do parního kolektoru průměru 457 mm o tloušťce pláště 32 mm.

Horký a studený kolektor je tvořen třemi částmi. Horní část kolektorů je opatřena víkem, uzavírajícím vstup do prostoru I. okruhu. Ve střední části jsou vyvrtány otvory pro teplosměnné trubky o rozměrech 16 x 1,5 mm. Spodní část kolektorů je přivařena k nátrubkům hlavního cirkulačního potrubí.

Jako materiál jednotlivých elementů parního generátoru byly voleny, zkušenostmi již ověřené, ocele 20 K, 22 K a 08Ch18N10T.

Konstrukční řešení PG je v příloze: výkres SN 212 01.

Pro primární stranu parního generátoru byly vypočteny hydraulické ztráty: v příváděcím a odváděcím potrubí, v teplém i studeném kolektoru, na vstupu a výstupu I. média do teplosměnných trubek a také ztráty třením způsobené samotným prouděním v trubkách. Celková tlaková ztráta je přibližně 200 kPa. Znalost tohoto parametru je nutná pro výpočet příkonu motoru cirkulačního čerpadla.

Pro parní generátor je jako odlučovač vlhkosti z vyrobené páry zvoleno žaluziové separační zařízení. Tento separátor je rozdělen na dva díly, které jsou vedle sebe s malým sklonem umístěny v horní části tlakové nádoby parního generátoru. Celková průtočná plocha obou částí separátoru je 17 m^2 , výška žaluzie činí $0,94 \text{ m}$ a rozteč mezi žaluziemi je $0,01 \text{ m}$. Celková tlaková ztráta v separátoru je vzhledem k energetickým parametrům páry zanedbatelná.

Rychlost páry v žaluziích by se měla pohybovat v rozmezí od $0,21$ do $0,72 \text{ m/s}$ a v žádném případě by neměla překračovat kritickou rychlost $1,18 \text{ m/s}$. V našem případě je pracovní rychlost páry v žaluziích přibližně $0,4 \text{ m/s}$.

12. Seznam použité literatury

- [1] Černoch, S.: *Strojně technická příručka*, SNTL Praha, 1968
- [2] Černý, V., Janeba, B., Karták, J., Jirouš, F., Marvan, B.: *Základy konstruování kotlů a parogenerátorů jaderných elektráren*, ČVUT Praha, 1974
- [3] Dubšek, F.: *Jaderná energetika*, VUT Brno, 1974
- [4] Hejzlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren (I. a II. díl)*, ČVUT Praha, 2005
- [5] Janalík, J., Šťáva, P.: *Mechanika tekutin*, VŠB-TU Ostrava, FS, 2002
- [6] Janeba, B.: *Kotelní agregáty a parogenerátory*, ČVUT Praha, 1975
- [7] Janeba, B., Karták, J.: *Tepelné výpočty kotlů a parních generátorů*, ČVUT Praha, 1982
- [8] Kadlec, Z.: *Sdílení tepla*, SPBI, 2006
- [9] Leinveber, J., Vávra, P.: *Strojnické tabulky*, ALBRA-pedagogické nakladatelství Úvaly, 2006
- [10] Mazanec, K.: *Základní fyzikálně-metalurgické charakteristiky materiálů pro jadernou energetiku*, VŠB-TU Ostrava, 1979
- [11] Noskievič, J.: *Hydromechanika*, VŠB-TU Ostrava, 1979
- [12] Ražnjevič, K.: *Termodynamické tabulky*, Alfa Bratislava, 1984

- [13] Zvara, J.: *Separtóry a prihrievače pary pre jadrové elektrárne*, SVŠT Bratislava, 1976
- [14] *Kontrolní výpočet pevnosti parogenerátoru – část I*, VŽSKG, 1979
- [15] *Normy rasčota na pračnost elementov reaktorov, parogeneratorov, sosudov i truboprovodov atomnykh elektrostancij, opytnych i issledovatel'skich jadernych reaktorov i ustanovok*, Moskva, 1973

13. Přílohy

Příloha č. 1: Chemické složení ocelí 22K a 08Ch18N10T

Příloha č. 2: Schéma jaderné elektrárny VVER 640

Výkresová dokumentace:

SN 212 01: Parní generátor VVER 640

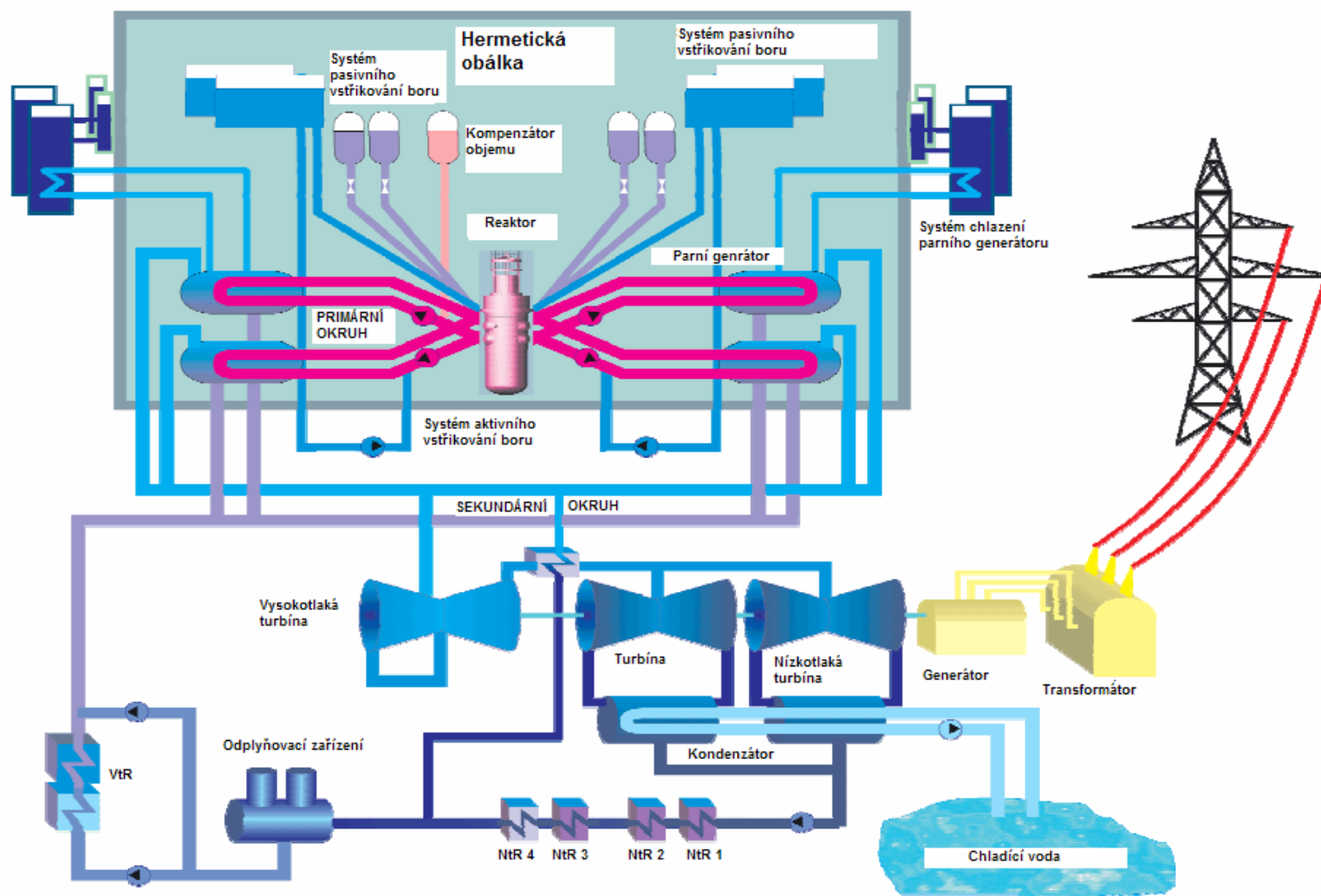
SN 212 02: Parní generátor VVER 640 – kusovník

SN 212 03: Žaluzie separátoru

Příloha č. 1: Chemické složení ocelí 22K a 08Ch18N10T

Ocel	Obsah prvků									
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Ti	P	S
	[%]									
22K	0,21	0,90	0,30	0,42	0,30	0,11	0,03	0,05	0,025	0,025
08Ch18N10T	max. 0,1	max. 2,0	max. 1,0	9,5 - 12	17 - 19	-	-	min. 5xC	max. 0,045	max. 0,03

Příloha č. 2: Schéma jaderné elektrárny VVER 640



Touto cestou bych rád vyjádřil poděkování Prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.

Poděkování patří také mým rodičům za obětavou podporu během studia.